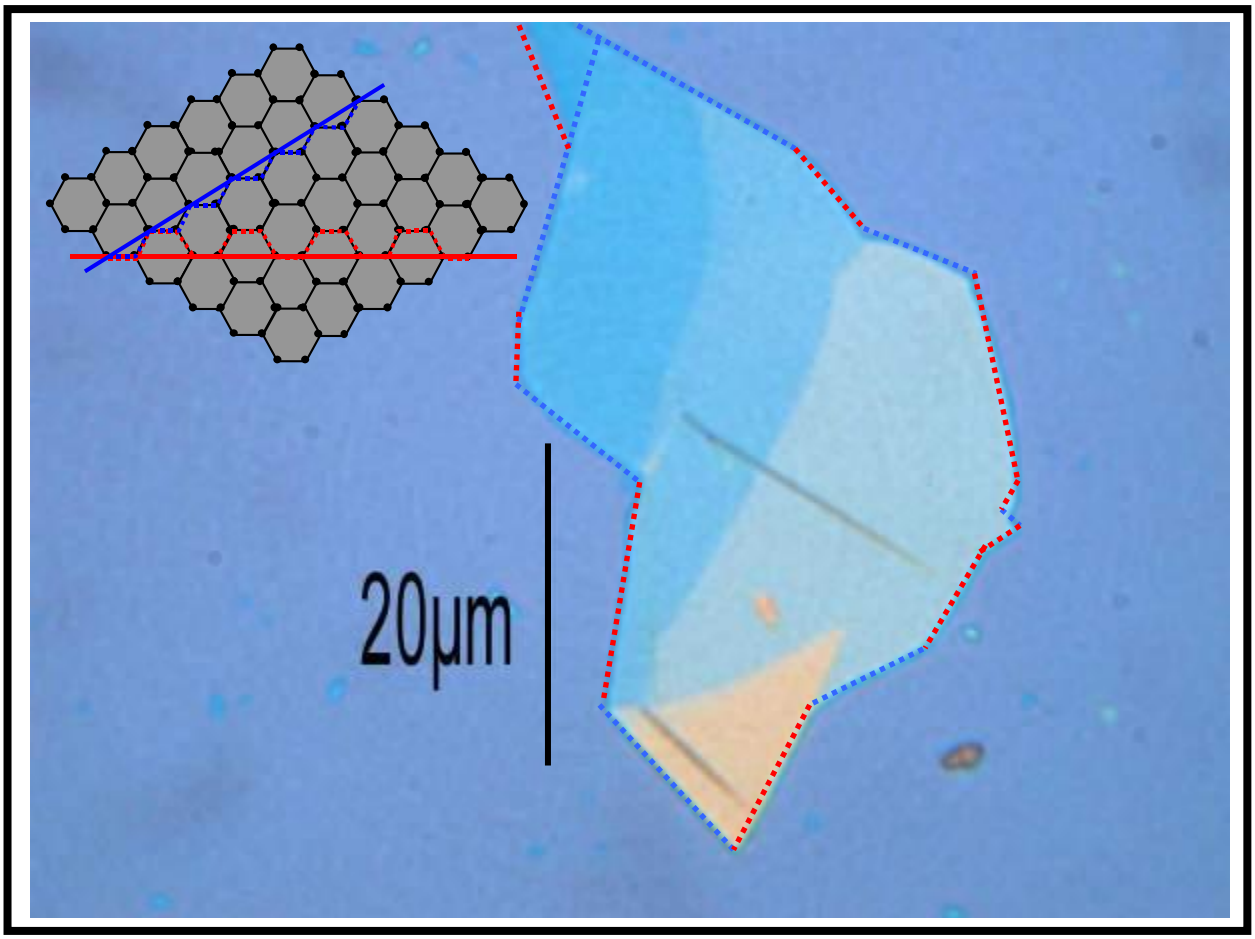
Graphen



Jugend-forscht-Arbeit

von Luca Banszerus, Tobias Kaufmann und Michael Schmitz

2008

Gliederung

1. Kurzfassung

2. Einleitung

3. Von Graphen zu Graphit

4. Graphen

4.1 Herstellung von Graphen
4.2 Kontaktierung von Graphen
4.2.1 Kontaktierung mit dünnen Spitzen
4.2.2 Die Lichtbogenkammer
4.2.3 Zufallskontaktierung
4.2.4 Lithographie
4.3 Bau eines Sperrzonen-FET auf Graphenbasis
4.4 Graphen als Sensor

5. Fazit

6. Ausblick

7. Danksagung

8. Links und Literatur

9. Bildquellenverzeichnis

1. Kurzfassung

Graphen ist zurzeit einer der aktuellsten Forschungsgegenstände der Physik. Noch vor vier Jahren glaubte man, dass solche einatomlagige Kohlenstoffschichten nicht existieren könnten. Inzwischen ist deren Herstellung jedoch in wenigen Labors der Welt gelungen. Die Herstellung von Graphen mit schulischen Mitteln stellt allerdings eine sehr große Herausforderung dar. Nach vielen Fehlversuchen ist es uns mehrfach gelungen monolagiges Graphen auf einem Si-SiO_2-Wafer herzustellen und mit einem Auflichtmikroskop zu untersuchen. Um die elektrischen Eigenschaften des Graphens zu untersuchen, muss man es zuerst kontaktieren. Dies stellte sich als besonders schwierig heraus, da die Graphenflakes gerade mal 20-30µm groß sind. Nach der erfolgreichen Kontaktierung ist es uns bereits gelungen einen Sperrzonen-Feldeffekttransistor auf Graphenbasis herzustellen. Dies ist ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Kohlenstoffelektronik, die die Siliziumtechnologie ergänzen, wenn nicht sogar aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften ablösen kann. Weiterhin untersuchten wir die sensorischen Eigenschaften des Graphens. Bis zum Wettbewerb wollen wir unsere bisherigen Versuche kultivieren und erweitern.

2. Einleitung

Die Nanowelt ist ein hochaktuelles und zukunftsträchtiges Forschungsgebiet, welches sich in einem Raum abspielt, der mit dem bloßen Auge bei weitem nicht mehr zu erkennen ist. Wir sprechen von einem Raum, in dem man die klassischen Naturwissenschaften Physik und Chemie nicht mehr klar voneinander trennen kann.

Von dem Element Kohlenstoff, welches unter anderem in der Biosphäre eine tragende Rolle spielt, sind neben den altbekannten Modifikationen Graphit und Diamant mittlerweile drei weitere Erscheinungsformen entdeckt worden. 1985 wurden die Fullerene, Kohlenstoffmoleküle aus 60 Atomen (C_{60}) entdeckt. Sie sind genau wie ein Fußball aus Fünf- und Sechsecken aufgebaut. Als Revolution am Horizont der Mikroelektronik tauchten die 1993 entdeckten einwandigen Kohlenstoffnanoröhrchen auf, die die Optimisten bereits als Ablösung der Siliziumtechnologie sahen. Sie befinden sich jedoch noch bis heute im Stadium der Grundlagenforschung. 2004 entdeckte die Forschungsgruppe um Prof. Andre Geim an der University of Manchester die neuste Konfiguration des Kohlenstoffs, das Graphen (mit Betonung auf der letzten Silbe). Dabei handelt es sich um eine einatomlagige Kohlenstoffmodifikation mit bahnbrechenden Eigenschaften. So ist im Graphen z.B. ein ballistischer Elektronentransport über ca. 400nm möglich. Bis zu seiner Entdeckung hielt man die Existenz von Graphen für theoretisch unmöglich, da man dachte, dass die Bewegung der Atome selbst das Gitter zerfallen ließe. Ein solch neuer Stoff, der das Potenzial besitzt die Mikroelektronik zu revolutionieren, reizte uns sehr. Besonders faszinierten uns dabei die vielen praktischen Anwendungsgebiete des Graphens, die vom Einsatz als Halbleiter-materialien in elektrischen Schaltkreisen bis hin zu hochempfindlichen Gassensoren in Messgeräten reichen.

3. Von Graphen zu Graphit

Bei Graphen handelt es sich um eine einatomlagige Schicht hexagonal angeordneter Kohlenstoffatome (Abb.3.1). Mehrere durch schwache Bindungen verbundene Graphenschichten ergänzen sich zu einem Graphitkristall (Abb. 3.2). Graphen wird oft als zweidimensionale Kohlenstoffmodifikation bezeichnet. Dadurch, dass das Graphen nur eine Atomlage dick ist, besitzt es außergewöhnliche elektrische Eigenschaften.
So beträgt die mittlere freie Weglänge der Elektronen, das ist die Strecke, die ein Elektron zurücklegen kann, bevor es gegen ein Kohlenstoffatom stößt, ca. 400nm im Graphen.
Im Silizium beträgt diese Strecke lediglich 4nm. Damit sind durch das Graphen ballistische Bauteile in greifbare Nähe gerückt.

Weiterhin besitzt Graphen keine Bandlücke, was allerdings ein Problem bei der Nutzung des Graphens für Halbleitermaterialien darstellt, da im „Aus“-Zustand des Transistors noch Ströme fließen. Man kann allerdings eine „künstliche“ Bandlücke erzeugen, indem man „Graphenstreifen“ mit einer Breite von ca. 10nm herstellt, wodurch der Spielraum der Ladungsträger eingeschränkt wird.

Weiterhin charakteristisch ist auch die Form des Graphens: die Innenwinkel der Bruchstellen sind immer ein Vielfaches von 30°. Das liegt an den zwei verschiedenen Bruchstellenvarianten „Armchair“ und „Zigzag“ (Abb. 3.1), die ebenfalls bei den Kohlenstoffnanoröhrchen eine wichtige Rolle spielen.

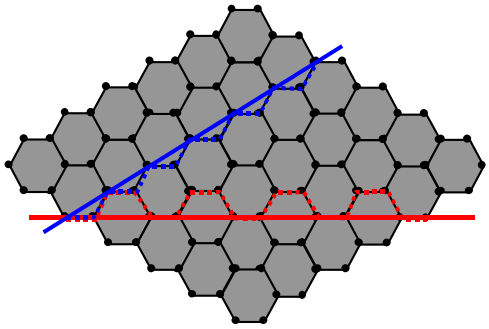


Abb. 3.1: Zigzag-Kante(blau) und Armchair-Kante(rot)

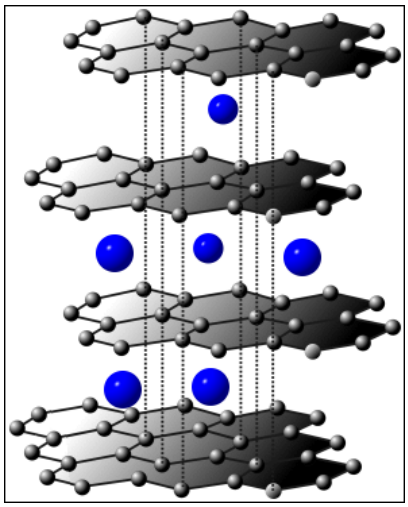


Abb. 3.2: Graphenschichten (grau) ergänzen sich zu Graphit

4. Graphen

Nachdem wir uns mit der Theorie des Graphens beschäftigt hatten, wollten wir uns an die Herstellung, Kontaktierung und Untersuchung von Graphen herantasten. Mit dem fertig kontaktierten Stück wollten wir dann eventuelle Reaktionen auf Gase, Magnetfelder, Wärme etc. testen. Der krönende Abschluss unseres Projektes wäre es, einen Feld-Effekt-Transistor aus Graphen zu bauen. Doch der Weg dorthin sollte mit vielen Problemen gepflastert sein.

4.1 Herstellung von Graphen

Laut diversen Papers über die Herstellung von Graphen verwendet man ein recht einfaches Low-Tech-Verfahren: Man nimmt ein Stück Klebeband und drückt es auf einen Graphitstab oder -block. Anschließend drückt man es auf einen Si-SiO_2-Wafer. Ein Si-SiO_2-Wafer ist eine dünne Siliziumscheibe, die mit SiO_2, beschichtet wurde (Abb. 4.1). Da man das Graphen nur bei einer bestimmten SiO_2-Schichtdicke sehen kann, ist es wichtig, dass die Höhe der SiO_2-Schicht z.B. exakt 300nm beträgt.

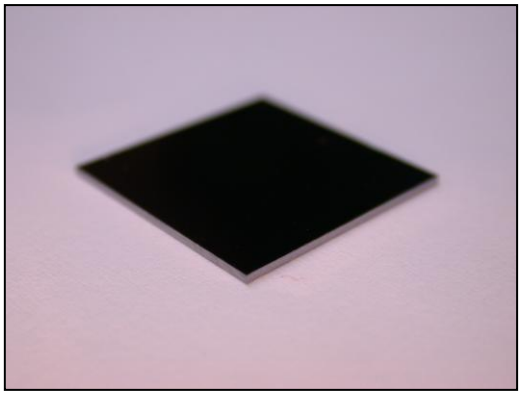


Abb. 4.1: Si-SiO_2-Wafer

Da wir keine Wafer besaßen, probierten wir Graphen auf einem normalen Objektträger herzustellen. Dazu zerbrachen wir einen frischen Graphitstab und drückten auf die frische Bruchstelle ein Stück Klebeband. Dieses falteten wir nun einige Male um das Graphit zu verteilen und auszudünnen. Danach drückten wir es auf einen Objektträger. Auf dem Objektträger war nun ein leichter, gräulicher Glanz zu erkennen. Unter dem Mikroskop konnten wir einige schwarze Brocken ausmachen. Allerdings waren die Ränder dieser Brocken nicht wie die des Graphens in 30° und 130° Winkeln gebrochen, also konnten wir ausschließen, dass es sich dabei um Graphen handelte. Uns wurde klar, dass wir ohne die Si-SiO_2-Wafer nicht weiter kämen. Überraschend konnte uns aber unser Betreuungslehrer Walter Stein weiterhelfen. Durch gute Kontakte zu einem seiner ehemaligen Schüler erhielten wir einige Wafer!
Gespannt drückten wir das Klebeband auf den Wafer. Jetzt mussten wir es nur noch mit einem Auflichtmikroskop untersuchen und eine Graphenschicht finden. Unglücklicherweise besaßen wir kein Auflichtmikroskop in der Schule, bei dem das Licht direkt vom Objektiv auf die Probe gestrahlt wird. Versuche, das Licht über ein zweites Okular in das Objektiv einzuspeisen oder die Probe von der Seite zu bestrahlen scheiterten, da man ein viel zu starkes Gegenlicht im freien Okular hatte oder einfach nichts sah. Allerdings konnte uns auch hier ein Lehrer helfen, der gute Kontakte zur Uni Bonn besitzt und uns ein Auflichtmikroskop mit 500facher Vergrößerung zur Verfügung stellen konnte. Später erwarben wir auch bei einem bekannten Internetauktionshaus ein preiswertes Auflichtmikroskop. Als wir nun endlich mit der Untersuchung unserer Probe beginnen konnten, wurden unsere Erwartungen durch eine große Spur aus Klebstoffrückständen gedämpft. Anscheinend hatte sich nicht nur das Graphit bzw. Graphen, sondern auch jede Menge Klebstoff auf dem Waferstück abgeschieden (Abb. 4.2).

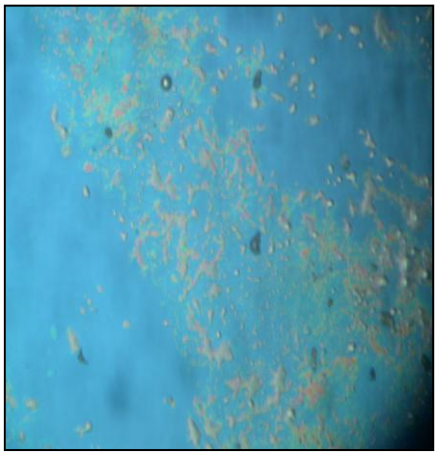


Abb. 4.2: Waferstück mit Klebstoffresten

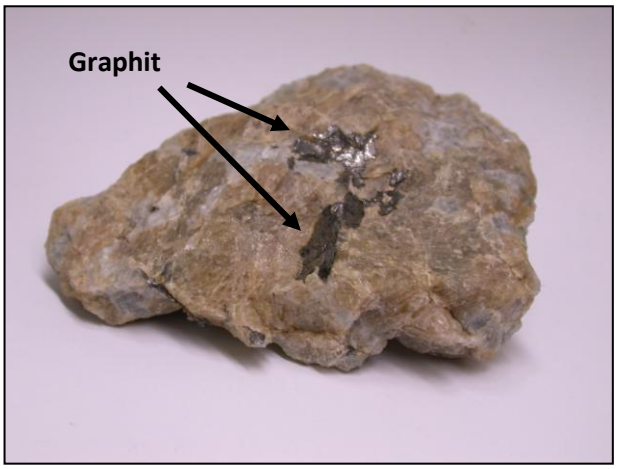


Abb. 4.3: Gestein mit natürlichem Graphit

Nach umfangreichen Recherchen hatten wir eine Lösung gefunden: Die Klebstoffrückstände ließen sich mit Aceton lösen. Allerdings hinterließ dieses wieder einen Rückstand, der uns die Sicht versperrte. Doch dafür fanden wir nach einigen Versuchen eine Lösung; Propanol löste die Rückstände des Acetons.

Als wir die Probe unter unserem Mikroskop untersuchten, stellten wir fest, dass wir das erste Graphen „Made in Bad Münstereifel“ erzeugt hatten. Die Graphenflöcken waren allerdings sehr winzig. Uns wurde schnell klar, dass der Graphitstab für unser Vorhaben nicht besonders gut geeignet war, denn er besteht aus gepresstem Graphitpulver. Erst als wir auf die Idee kamen natürliches Graphit (Abb. 4.3) für die Herstellung von Graphen zu nutzen, wuchsen unsere Graphenflakes noch einmal um ein Vielfaches (Abb.: 4.4). Das lag daran, dass die Graphenschichtenstruktur im natürlichen Graphit über größere Bereiche intakt ist.

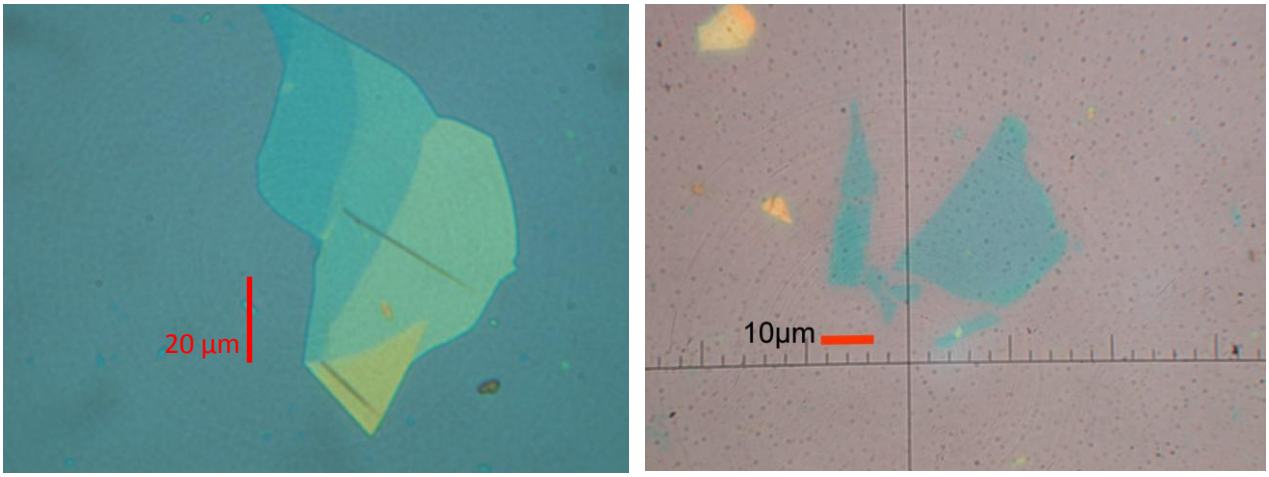


Abb. 4.4: Mehrlagige Graphenschichten und Graphen „Made in Bad Münstereifel“

4.2 Kontaktierung von Graphen

4.2.1 Kontaktierung mit dünnen Spitzen

Um das Graphen zu kontaktieren entschlossen wir uns dünne Nadelspitzen herzustellen und diese auf das Graphen zu drücken. Zuerst nahmen wir handelsübliche Stecknadeln und schliffen sie an. Mit diesen Spitzen konnten wir zwar große Graphitbrocken kontaktieren (Abb. 4.5), für das hundert Mal kleinere Graphen waren die Nadeln aber nicht fein genug. Im Internet recherchierten wir nach Verfahren um dünnere Spitzen herzustellen. Dabei stießen wir auf ein elektrochemisches Verfahren zur Herstellung von RTM-Spitzen, bei dem man einen Platin/Iridium-Draht in Natronlauge taucht und eine Spannung anlegt. Allerdings überstieg selbst ein kurzes Stück Pt/Ir-Draht den Etat unserer Miniforschung. Deshalb probierten wir dieses Verfahren mit Kupfer- anstatt mit Platin/Iridium-Drähten durchzuführen. Die Spitzen des Kupferdrahtes wurden äußerst fein, jedoch stellte sich heraus, dass die Drähte zu weich für eine sichere Kontaktierung waren.

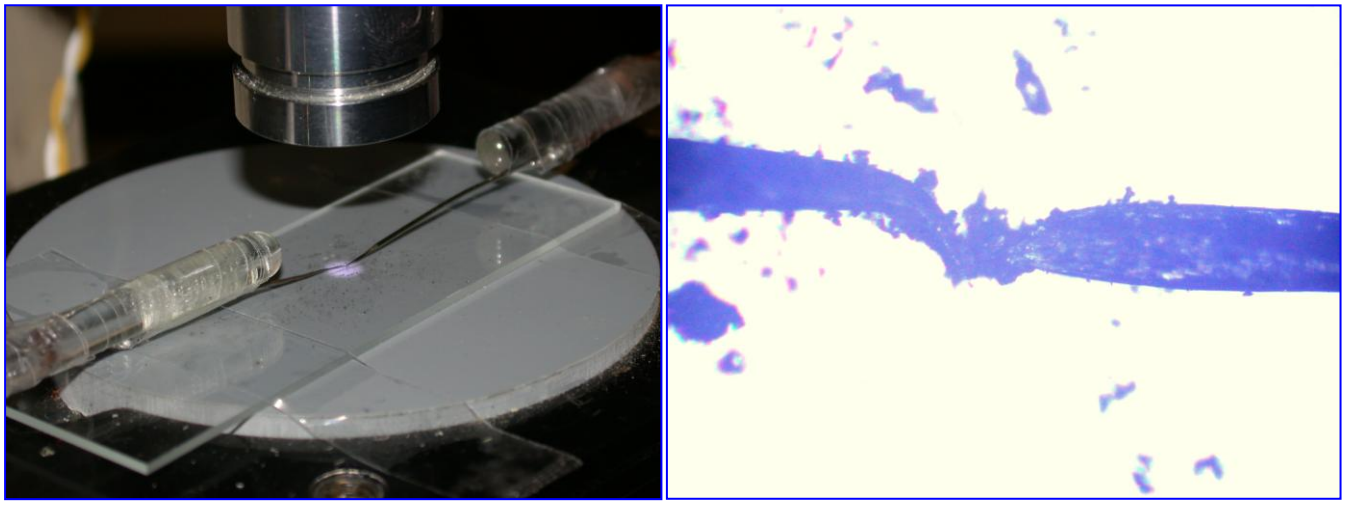


Abb. 4.5: Graphitflocke kontaktiert mit zwei Spitzen

4.2.2. Lichtbogenkammer

Da das Graphen mit dieser Methode nicht zu erreichen war, suchten wir nach einer anderen Methode der Kontaktierung.

Wir dachten uns, dass das Problem der Kontaktierung gelöst sei, wenn es uns möglich wäre einen Wafer großflächig mit Graphen zu beschichten. Wir benutzten dazu die Lichtbogenkammer, die in unserer Schule verwendet wurde um Kohlenstoff Nanoröhrchen herzustellen (Abb. 4.6). In der Kammer befindet sich eine Heliumatmosphäre (600mbar). Zwei Graphitstäbe werden als Elektroden eines Schweißgerätes genutzt. Das Graphit verdampft durch den Lichtbogen und setzt ich auf dem Wafer ab. Bedauerlicherweise setzte sich das Graphit lediglich als Ruß auf dem Wafer ab.

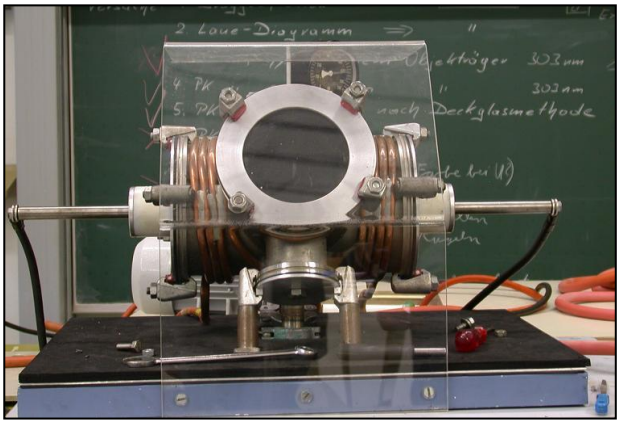


Abb. 4.6: Die Lichtbogenkammer

4.2.3 Zufallskontaktierung

Da die Kontaktierung mit den Spitzen gescheitert war und es uns auch nicht gelang einen Wafer zu beschichten, entschlossen wir uns die Graphenflakes nach dem Zufallsprinzip zu kontaktieren. Dazu stellten wir ein paar Graphenproben auf dünnen Deckgläschen her und versuchten diese mit einem feinen Rasierklingenspalt zu kontaktieren. Sobald man einen Strom messen kann und man unter dem Mikroskop keine Graphitflocke im Spalt sieht, befindet sich eine Graphenflocke im Spalt.

Wir versuchten mit Hilfe von zwei Rasierklingen einen Spalt von 10µm Breite zu erzeugen. Vorteilhaft ist hierbei, dass die Klingen maschinell und hochpräzise gefertigt sind und nur eine Schneidenbreite von etwa 10µm haben (Abb. 4.7 und 4.8).

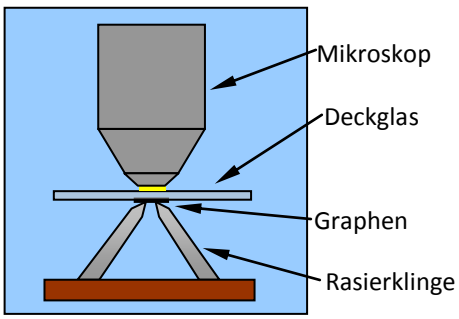


Abb. 4.7: Rasierklingenspalt mit Graphenflakes unter dem Mikroskop

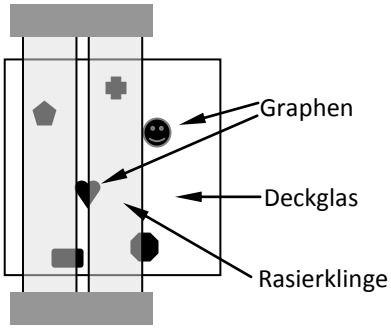


Abb. 4.8: Rasierklingenspalt

Da das von uns hergestellte Graphen eine maximale Größe von etwa 30µm erreicht, musste der Abstand der beiden Klingen bei ca. 10-20µm liegen. Da wir unter einem Mirkroskop aufgrund der geringen Tiefenschärfe den Abstand der Schneiden nicht einfach ausmessen konnten, bedienten wir uns des Einzelspaltexperiments.

Dabei wird ein Laserstrahl mit bekannter Wellenlänge durch den Spalt geführt. Stellt man dahinter einen Schirm auf, so kann man ein Interferenzmuster erkennen. Mit dem Schirmabstand zum Spalt, dem Abstand der Minima auf dem Schirm und der Wellenlänge des Lasers lässt sich dann die Spaltbreite berechnen. Für den Abstand der beiden inneren Intensitätsminima erwarteten wir bei einem Spalt mit einer Spaltbreite von 10µm einen Wert von $2\Delta a_1 = 38cm$

Zu unserer Überraschung verschwanden jedoch bei einer Spaltbreite von ca. 25µm die Intensitätsminima, so dass keine Messung von $2\Delta a_1$ möglich war (Abb. 4.9).

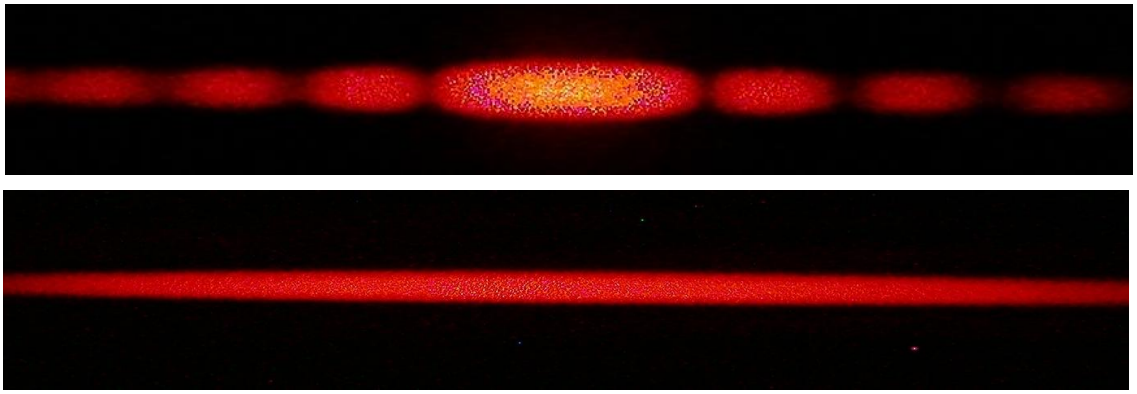


Abb. 4.9: Interferenzmuster des Rasierklingenspaltes
Oben „normales“ Interferenzmuster und unten überlagertes Muster

Da die Physik aber auch im Bereich von 10µm gilt, erklärten wir uns dieses Phänomen wie folgt: Im Bereich des Laserstrahldurchmessers war der Spalt doch nicht so ideal wie gedacht. Er ist im Bereich des Strahldurchmessers mal breiter und mal enger (Abb. 4.10). Dadurch überlagern sich die einzelnen Interferenzmuster zu einem durchgehenden Strich.

Aus den oben genannten Gründen schoben wir nun die Rasierklingen einfach so nah aneinander, dass gerade kein Strom floss. Dazu bauten wir uns einen Klingenschlitten, den

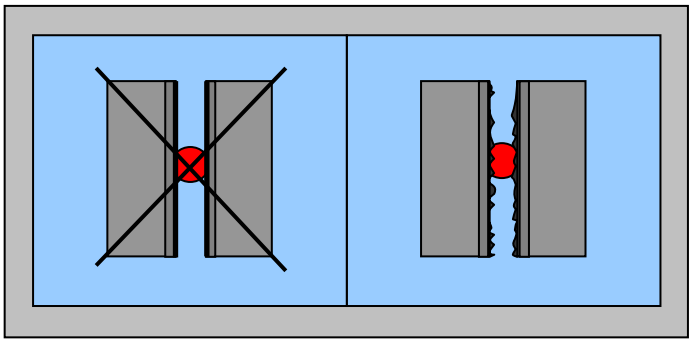


Abb. 4.10: Links idealer Spalt, rechts realer Spalt

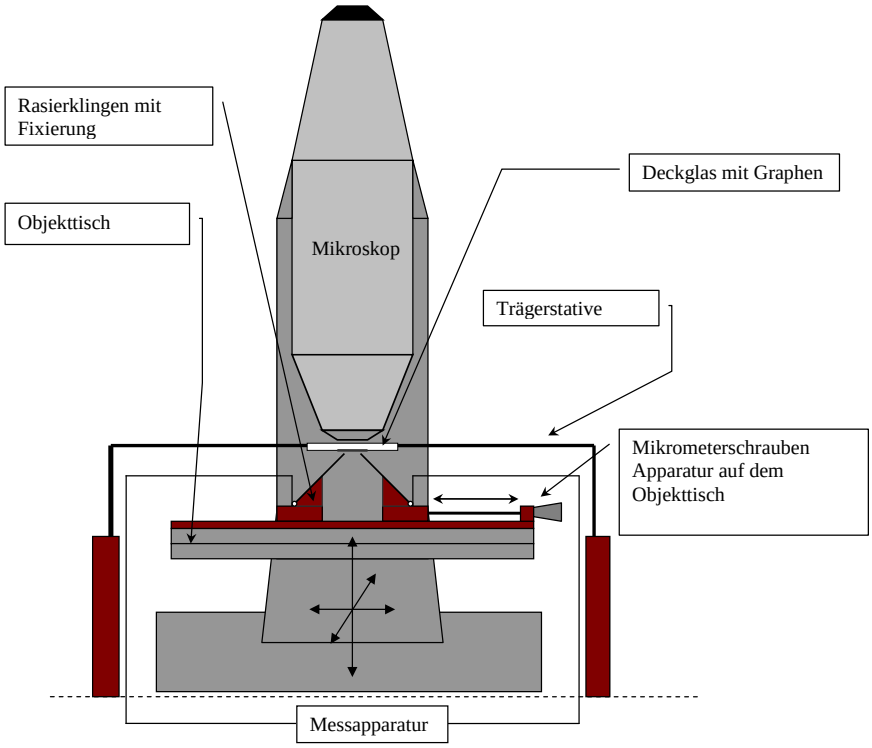


Abb. 4.11: Rasierklingenschlitten unter dem Mikroskop

wir mit einer Mikrometerschraube bewegten (Abb. 4.11).
Auf den Objektisch des Mikroskops wird eine Rasierklingenapparatur montiert. Diese besteht aus einer festen Klinge und einer, durch eine Mikrometerschraube annäherbaren Gegenklinge. Zwischen Rasierklingen und Mikroskoplinse wird ein mit Graphen beschichtetes Deckglas umgekehrt fixiert. Die Graphenschicht zeigt also nach unten. Wenn die Rasierklingen auf den gewünschten Abstand geschraubt sind, kann man sie mit Hilfe des Objekttisches unter dem Deckglas positionieren, bis man Graphen kontaktiert. Um sicherzugehen, dass man kein Graphit kontaktiert hat, kommt das Mirkoskop zum Einsatz. Graphit ist auf dem Glas sichtbar, Graphen nicht. Kontakt mit Graphen besteht also dann, wenn ein Strom durch eine nicht sichtbarer Fläche fließt. Nachdem wir die Apparatur gebaut hatten, führten wir erste Experimente durch. Hier traten auch prompt Probleme auf. Es war nicht möglich die Klingen so zu montieren, dass sie im Mikrometerbereich auf der exakt gleichen Höhe standen. Weiterhin standen die Klingen leicht versetzt zueinander. Ein weiteres Problem war die hohe Biegsamkeit der Klingen. Dies führte dazu, dass ein Kurzschluss schon bei sehr geringem Anpressdruck entstand.

4.2.4 Lithographie

Nach unseren zahlreichen Misserfolgen fragten wir uns, wie es die Profis schaffen so kleine Objekte (30µm) zu kontaktieren. Dazu wandten wir uns an das Institut für angewandte Mikro- und Optoelektronik der RWTH Aachen. Dort erfuhren wir, dass auch die Profis so kleine Objekte nicht direkt mit Nadeln kontaktieren können. Sie benutzen lithographische Verfahren um kleine Objekte mit Titankontakten zu versehen. Die dabei entstehenden 80µm x 80µm

großen Pads können dann direkt kontaktiert werden (Abb.: 4.12). Das aufwendige Kontaktieren unter bis zu 500x Vergrößerung wird umgangen, ganz abgesehen davon, dass das Graphen durch die Nadeln sofort verletzt würde.

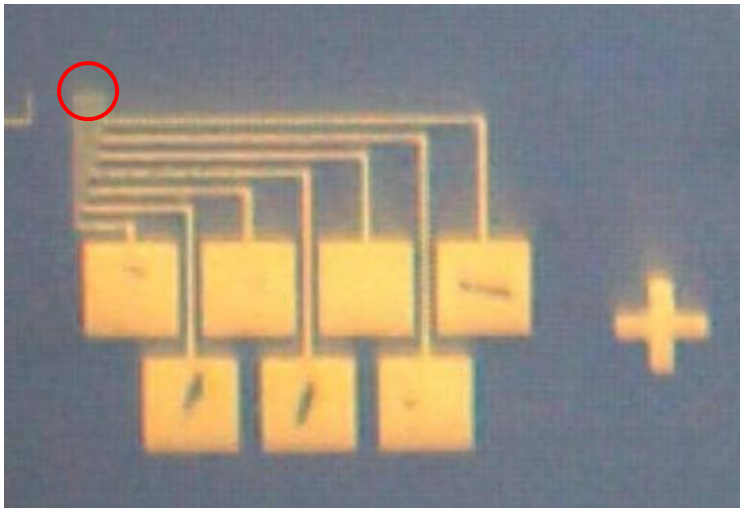


Abb. 4.12 Aufgedampfte Titankontakte

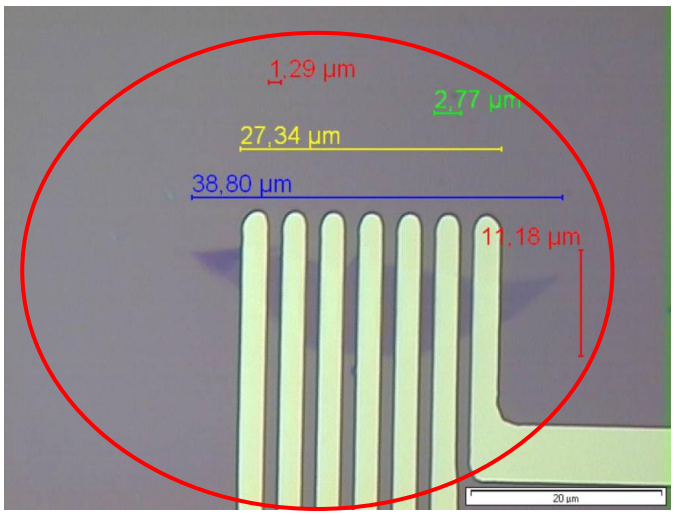


Abb. 4.13 Ausschnittsvergrößerung von Abb. 4.12

Da die Lithographie ein sehr aufwendiges und teures Verfahren ist, konnten wir sie an unserer Schule nicht durchführen. Freundlicherweise erklärte sich das Institut aber bereit, uns unsere beste Probe zu lithographieren. Zusätzlich schenkten sie uns noch ein Paar geätzte Wolframnadeln, da sie der Meinung waren, dass unser Projekt nicht das Ätzen dünner Spitzen ist, sondern die Herstellung und Untersuchung von Graphen.

Nun war die Kontaktierung unserer Graphenprobe in greifbare Nähe gerückt. Jedoch war größte Vorsicht geboten, denn nur eine Probe bedeutete auch nur eine einzige Chance. Ein Kratzer mit den Wolframnadeln über die Kontakthälse und unser Traum wäre wie eine Seifenblase zerplatzt. Um die Probe nicht zu gefährden, begannen wir mit einer sehr sorgfältigen Planung einer Kontaktapparatur.

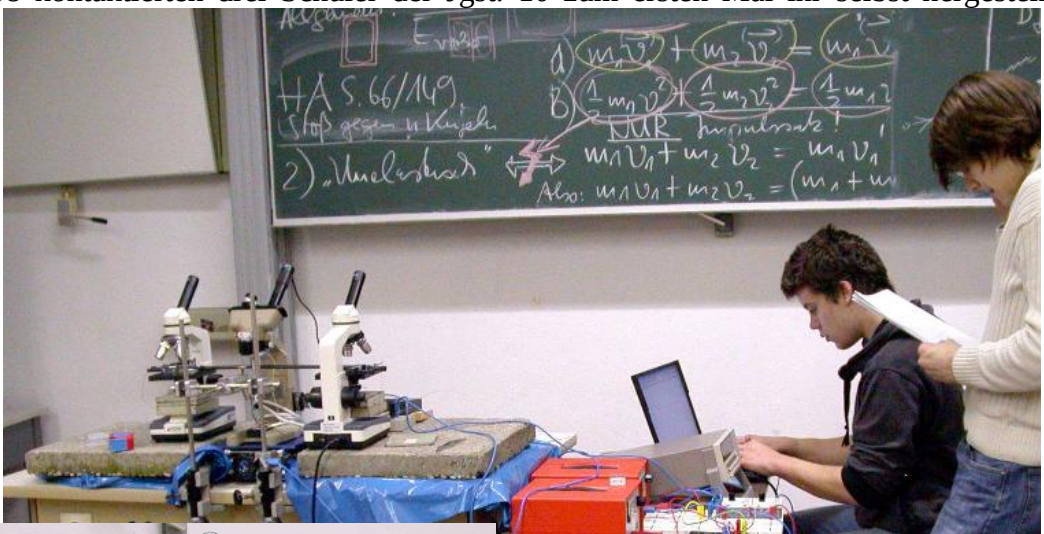
Das große Problem bestand in der Befestigung und Ausrichtung der Wolframnadeln. Die Profis benutzen dazu sogenannte Manipulatoren, mit denen man Nadeln im Mikrometerbereich sehr präzise in x-, y- und z- Richtung verschieben kann. Diese Manipulatoren kosten aber mehrere tausend Euro und waren für unsere Schule damit unbezahlbar. Tagelang suchten wir nach einer einfacheren Lösung des Problems. Da kam uns eine geniale Idee: Mikroskope! Deren Objekttische kann man ebenfalls sehr genau in x-, y- und z- Richtung bewegen. Zudem sind Mikroskope im Fundus der Schule vorhanden. Somit hatten wir also eine einfache und zugleich effiziente Lösung gefunden. Nun mussten wir nur noch die Nadeln befestigen. Auch hier fanden wir eine Lösung mit Alltagsgegenständen.

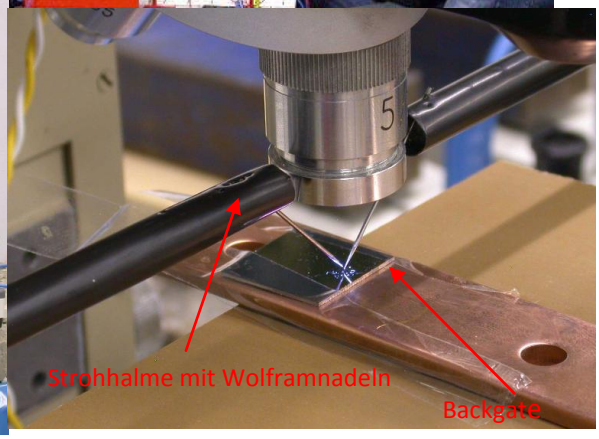
Wir füllten Eisenwolle in normale Strohhalme (Abb.: 4.14) und klebten diese auf Objektträger. Das hatte mehrere Vorteile:

- Man kann die Nadeln in beliebigem Winkel einstechen und sie werden sicher und flexibel kontaktiert.
- Die Kupferdrähte die zur Messapparatur führen müssen nicht an die Nadeln gelötet werden, sondern stecken am anderen Ende in der Eisenwolle. So erreichten wir, dass bei versehentlichem Zug nicht die Nadeln über den Wafer kratzen, sondern lediglich der Draht aus dem Strohhalm gleitet.

Zuletzt schlossen wir eine Webcam an das Mikroskop an, um durch Live-Übertragung das Kontaktieren zu erleichtern.

Nachdem wir die Apparatur aufgebaut hatten, stand der Kontaktierung nichts mehr im Wege. Zur Sicherheit übten wir das Fahren der Nadeln erst mal auf einem Dummy. Was wir sahen war aber mehr als beunruhigend. Die Nadeln vibrierten heftig auf der Probe. Alles, und sei es nur ein sachtes Auftreten, ließ die Nadeln beben. So konnten wir niemals einen sicheren Kontakt herstellen. Die zitternden Nadeln würden unsere Probe zerstören. Wir überlegten also, wie man die Vibrationen beseitigen könnte. Ein schwingungsfreier Untergrund musste her. Wir kauften also die Vogelsandbestände Bad Münstereifels auf und verteilten den Sand auf zwei Säcke. Auf die Sandsäcke legten wir dann schwere Gehwegplatten und auf diese stellten wir dann die Mikroskope (Abb.: 4.14). Und tatsächlich, die Vibrationen waren gedämpft, die Nadeln ruhig. Wir starteten gespannt unseren ersten Kontaktierungsversuch und am 15.2.08 kontaktierten drei Schüler der Jgst. 10 zum ersten Mal ihr selbst hergestelltes Graphen!





Luca Banszerus, Tobias Kaufmann und Michael Schmitz

Abb.4.14 Kontaktierungsapparatur im Detail

Da wir das Graphen nun endlich sicher kontaktiert hatten, beschlossen wir mit der Erforschung der elektrischen Eigenschaften des Graphens zu beginnen. Zuerst untersuchten wir den Einfluss der Spannung auf die Stromstärke (Abb. 4.15). Wie zu erwarten war erhielten wir eine linear ansteigende Funktion. Aus dem Diagramm (Abb.: 4.15) erhielten wir einen Widerstandswert von R≈17kΩ. Von unserem Besuch bei der RWTH Aachen wussten wir, dass der Kontaktwiderstand zwischen Titan und Graphen ca. 15kΩ beträgt. Somit ergibt sich als „intrinsischer“ Widerstand vom Graphen ein Wert von ca. 2kΩ.

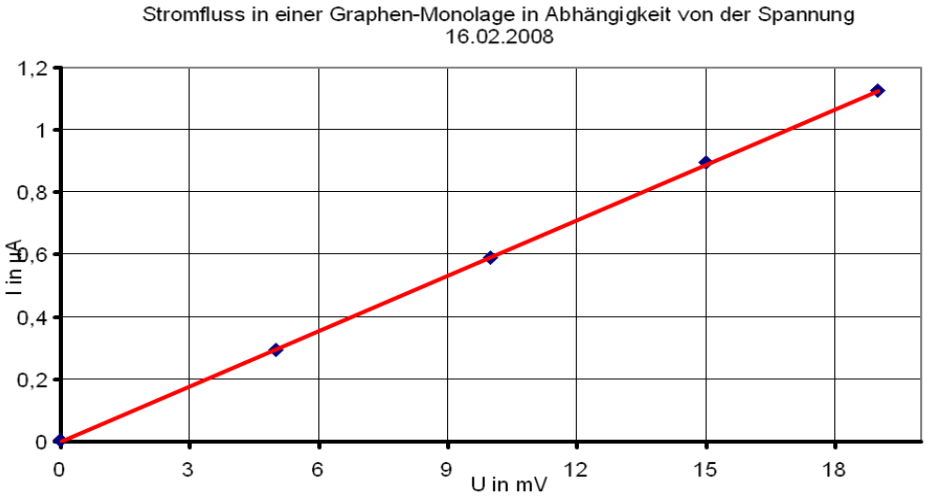


Abb.: 4.15

4.3 Bau eines Sperrzonen-FET auf Graphenbasis

Unser Traum war die Fertigung eines Sperrzonen-FET auf Graphenbasis. Dazu lässt man einen Strom durch das Graphen fließen. Um den „Aus“-Zustand zu erreichen legt man am dritten Kontakt dem sogenanntem „Gate“ eine vergleichsweise große negative Spannung an. Diese erzeugt ein elektrisches Feld, welches die Elektronen aus dem Graphen verdrängt. Das bedeutet, dass der Strom abgeschwächt und im Idealfall sogar unterbrochen wird (Abb. 4.16). Wir haben unsere Gatespannung über eine Kupferplatte an der Rückseite des Wafers (Backgate) und damit am isolierenden Silizium angelegt (Abb.: 4.14). Dies hat zwei große Vorteile. Erstens kann durch die SiO_2-Schicht (Isolator) kein Strom vom „Backgate“ durch das Graphen fließen, zweitens dringt das elektrische Feld besonders tief in den Isolator ein, sodass es das Graphen auf jeden Fall erreicht(Abb. 4.14). Wir legten an das Graphen selbst eine konstante Spannung von 10mV an. An das Backgate legten wir eine Spannung von 0 bis -30V an. Das Ergebnis unserer Messung war signifikant und reproduzierbar.

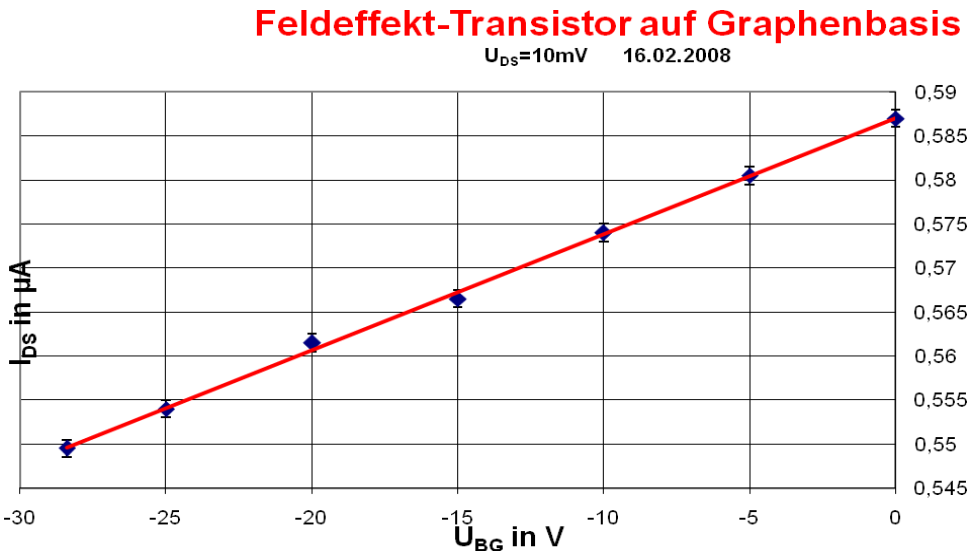


Abb.: 4.16

Durch den Kontakt zwischen depositioniertem Titan und dem Graphen entstand wie oben schon erwähnt ein Kontaktwiderstand von ca. 15kΩ. Diesen zogen wir vom Gesamtwiderstand ab, um die intrinsischen Daten des Graphens zu erhalten. So konnten wir zeigen, dass sich der Widerstand des Graphens von ca. 2kΩ auf über 3kΩ, also um rund 50% erhöhte (Abb. 4.17), wenn man die Backgatespannung von 0 auf -30V ändert.

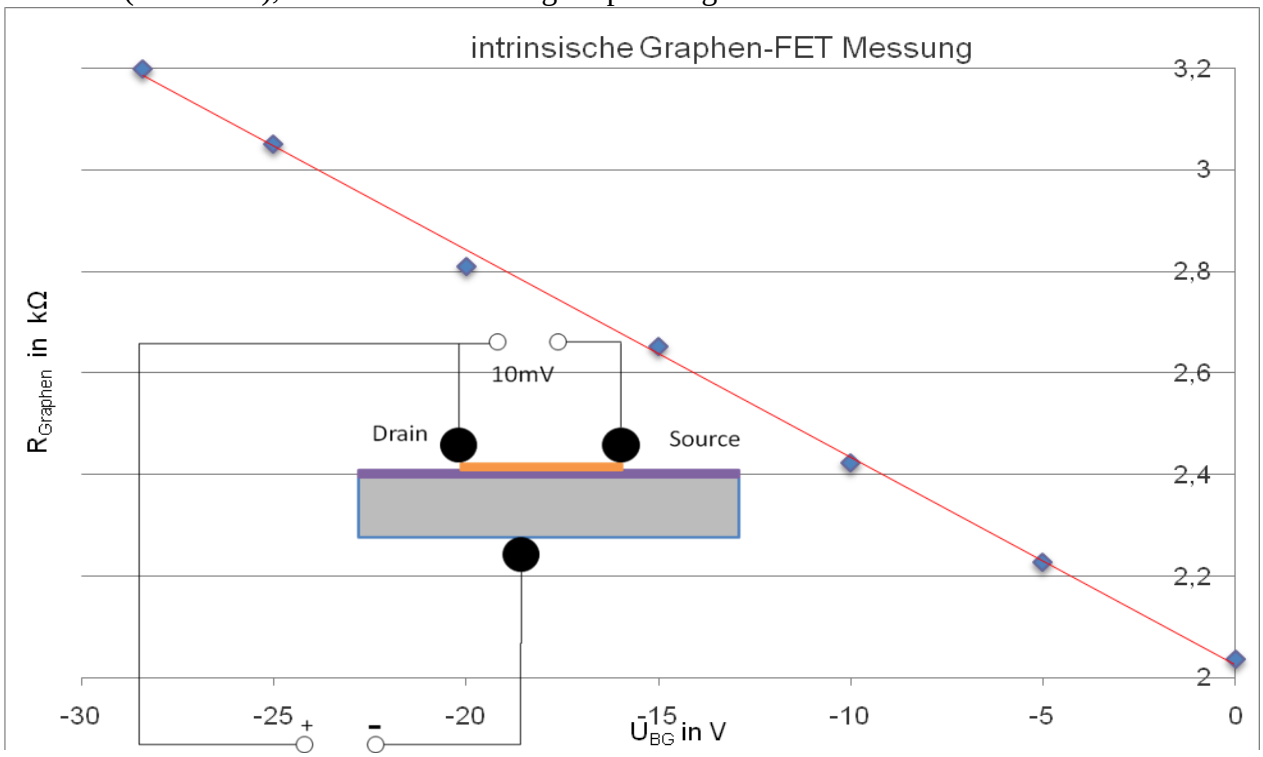


Abb. 4.17 Schaltplan und „bereinigte“ FET-Messung

4.4 Graphen als Sensor

Wenn wir einen Strom durch das Graphen fließen lassen, beobachten wir stets, dass sich für einen kleinen Zeitraum ($\Delta t \approx 15s$) nach Beginn der Messung, die Stromstärke ändert und danach relativ konstant bleibt. Das liegt daran, dass durch das entstehende elektrische Feld Partikel aus der Umgebung angezogen werden und den Stromfluss verändern. Daran allein kann man schon das große sensorische Potenzial des Graphen erkennen. Das Graphen kombiniert eine riesige Oberfläche mit einer sehr geringen Teilchenanzahl, das sind optimale Voraussetzungen für einen Sensor. Zudem erhöhen vereinzelte Fehler in der Kristallstruktur des Graphens die Reaktivität. Die Gasmoleküle verändern den Widerstand des Graphens, und damit die gemessene Stromstärke, indem sie entweder Elektronen aus den ungesättigten Doppelbindungen des Graphens an sich binden, oder ein weiteres Elektron für das Leitungsband zur Verfügung stellen.
Bei unserem Versuch haben wir geringe Mengen von Ammoniak-Gas verwendet.

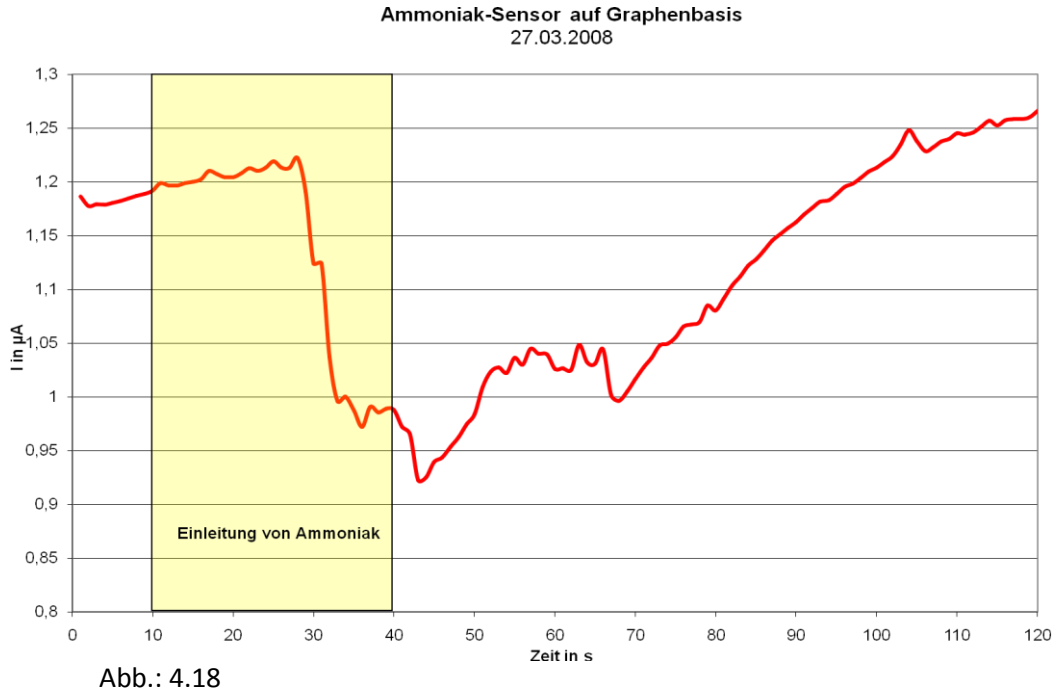


Abb.: 4.18

Während der gelb hinterlegten Phase haben wir das Gas mit Hilfe eines Trichters und einem daran befestigten Schlauch auf den Wafer geleitet. Zuerst befindet sich das Gas noch im Schlauch, doch sobald es das Graphen erreicht ist ein deutlicher Einbruch in der Stromstärke zu verzeichnen(Abb. 4.18). Wie man sieht, desorbiert das Gas wieder selbstständig vom Graphen.

5. Fazit

Seit Begin unseres Projektes im September 2007 haben wir viel erreicht. Wir haben die neue Kohlenstoffmodifikation Graphen in unserer Schule hergestellt und sichtbar gemacht. Nachdem wir die Kontaktierungsprobleme gemeistert hatten, gelang es uns mit einfachen Mitteln, aus Graphen einen funktionierenden Feldeffekttransistor und einen Gas-Sensor zu bauen. Wir hoffen damit einen kleinen Beitrag zu der Revolution geleistet zu haben, den die Kohlenstoffelektronik auslösen kann.

6. Ausblick

Bis zur Präsentation unserer Arbeit wollen wir die Experimente noch erweitern und kultivieren.

7. Danksagung

Wir danken allen, die uns bei unserer Arbeit unterstützten. Im Besonderen danken wir Herrn Stein, der etliche Stunden mit uns im Physiksaal verbrachte, sowie Herrn Dr. Max Lemme und Herrn Tim Echtermeyer von der AMO GmbH für die fachliche Unterstützung und die Lithographie, ohne die unser Projekt so nicht möglich gewesen wäre.

8. Literatur- und Linkliste

[1] www.nanowerk.com
[2] www.Wikipedia.org
[3] Nature2007 (S.181 – 190) [The Rise of the Graphene]
[4] Physik Journal 7/2007(S.39) [vom Graphit zum Graphen]
[5]http://www.faz.net/s/Rub163D8A6908014952B0FB3DB178F372D4/Doc~EBF975DDE034146E79F084E0E309A52C7~ATpl~Ecommon~Scontent.html?rss_googlefeed
[6] http://www.nzz.ch/2007/03/28/ft/articleezf6f_1.134752.html
[7] http://www.golem.de/0703/50897.html
[8] Nature Materials; 2007

9. Bildquellenverzeichnis

[1] Abb.3.2 Quelle: www.Wikipedia.de/Graphen

Alle anderen Grafiken wurden von uns erstellt.