



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физической электроники

Реферат на тему

**«Экспериментальное исследование зарядки алмазов при электронном
облучении»**

Выполнил студент

423 группы

Гареев Артур Маратович

Научный руководитель

к.ф.-м.н. Татаринцев А.А.

Москва

2020г.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия алмаз вызвал большой интерес как альтернатива проводящим металлическим и полупроводниковым холодным катодам [1].

Попытки создать матрицы на основе алмазов и алмазоподобных излучателей для работы в качестве дисплеев с полевой эмиссией, в конечном итоге были коммерчески неудачными, но потенциал использования алмазного нанокристалла, в качестве точечного источника электронов, не был систематически исследован ранее [1].

Непрерывный интерес к алмазной электронике основан на превосходных свойствах материалов, с помощью которых возможно сделать устройства высокой мощности. На данный момент такие устройства невозможны с обычными полупроводниками и другими широкозонными полупроводниками. [2].

Силовые устройства на основе алмаза будут улучшены благодаря широкой запрещенной зоне и увеличенному напряжению пробоя, высокой подвижности носителей и повышенной теплопроводности. Стабильность при высоких температурах, кроме того, позволит эксплуатировать алмазные устройства в экстремальных условиях окружающей среды [2].

Алмаз - это перспективный материал [3,4] и изучению его свойств пока уделено недостаточно внимания, как в России [5], так и за рубежом, остается много неизвестных нюансов. Так до сих пор остаются вопросы в области радиационной физики алмаза при электронном и ионном облучении. А одним из ключевых вопросов является радиационная стойкость и механизм дефектообразование и влияние этого механизма на процесс зарядки алмаза пучками заряженных частиц. Поэтому в последующей работе будет исследован механизм зарядки алмаза синтезированного в ТИСНУМ.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Алмаз - минерал, кубическая аллотропная форма углерода. При нормальных условиях метастабилен, то есть может существовать неограниченно долго. В вакууме или в инертном газе при повышенных температурах постепенно переходит в графит. Главные отличительные черты алмаза - высочайшая среди минералов твёрдость, наиболее высокая теплопроводность среди всех твёрдых тел, большой показатель преломления и дисперсия. Алмаз является широкозонным полупроводником. Сингония кубическая, кристаллическая решётка - кубическая гранецентрированная.

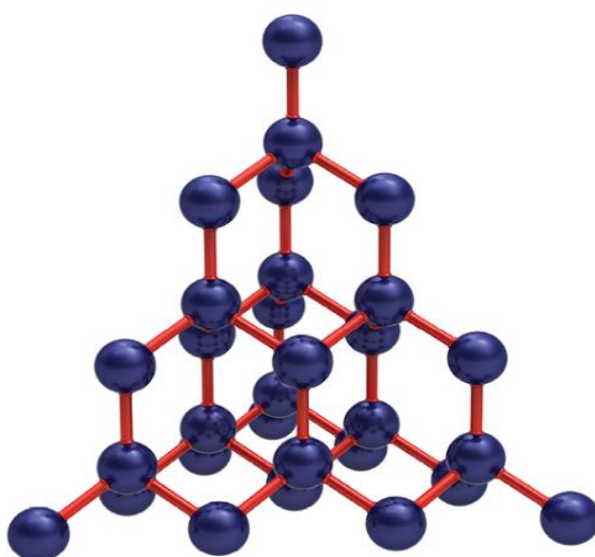


Рис. 1 - Кристаллическая решетка алмаза

Таблица 1. – Основные параметры алмаза.

Параметры	Значения
Кристаллическая решётка	кубическая гранецентрированная
Параметры решётки	$a = 3,57 \text{ \AA}$
Пространственная группа	Fd3m (F4 ₁ /d -3 2/m)
Средний атомный вес	12,01 аем
Температура плавления	3700—4000 С (при давлении ~11 Гпа)
Плотность	3,47—3,55 г/см ³
Диэлектрическая проницаемость	5,7
Ширина запрещённой зоны	5,46-6,4эВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАРЯДКИ АЛМАЗОВ

Для экспериментального исследования зарядки алмазов был использован электронно-зондовый комплекс на базе растрового электронного микроскопа (РЭМ), который позволяет фиксировать основные параметры зарядки, а именно, поверхностный потенциал $V_s(t)$, ток смещения I_D (аккумулируемый заряд Q) и ток утечки I_L . Для облучения образцов использовался сканирующий электронный микроскоп LEO - 1455V P, с помощью которого можно осуществлять зарядку образцов с фиксированной плотностью тока в диапазоне энергий от 200 эВ до 30 кэВ. По сдвигу спектра вторичных электронов (ВЭ), полученного с помощью электростатического секторного тороидального спектрометра, определяется поверхностный потенциал зарядки образца. Зависимость тока эмиссии от времени $I_e(t)$ в процессе зарядки сегнетоэлектриков электронными пучками измерялась при помощи полусферического коллектора электронов. Одновременно с этим измерялся ток с образца, который представляет собой сумму токов смещения и утечки $I_{L+D}(t)$. На рис. 2 представлена схема используемой экспериментальной установки.

Электронный зонд 1 СЭМ облучает диэлектрический образец 2, размещенный на подложке 3 в экранирующем держателе 4, который предотвращает наводки на измерительный тракт тока утечки I_L и смещения I_D , а также уменьшает область засветки исследуемого образца третичными электронами.

Часть вторичных или отраженных электронов проходит через секторный тороидальный спектрометр 5 с выходной щелевой диафрагмой 6 и регистрируется микроканальной пластиной 7. В отличие от полупроводникового датчика микроканальная пластина (МКП) позволяет регистрировать ВЭ с энергией до нескольких эВ, что позволяет исследовать области с низкой или даже положительной зарядкой (при подаче отрицательного смещения на держатель). Сигнал с МКП-детектора поступает

на блок обработки, а затем на ПК 8. Под управлением ПК включается электронный зонд РЭМ и синхронно запускается пилообразное питание спектрометра, в результате чего автоматически регистрируется весь энергетический спектр эмитированных электронов dN/dE .

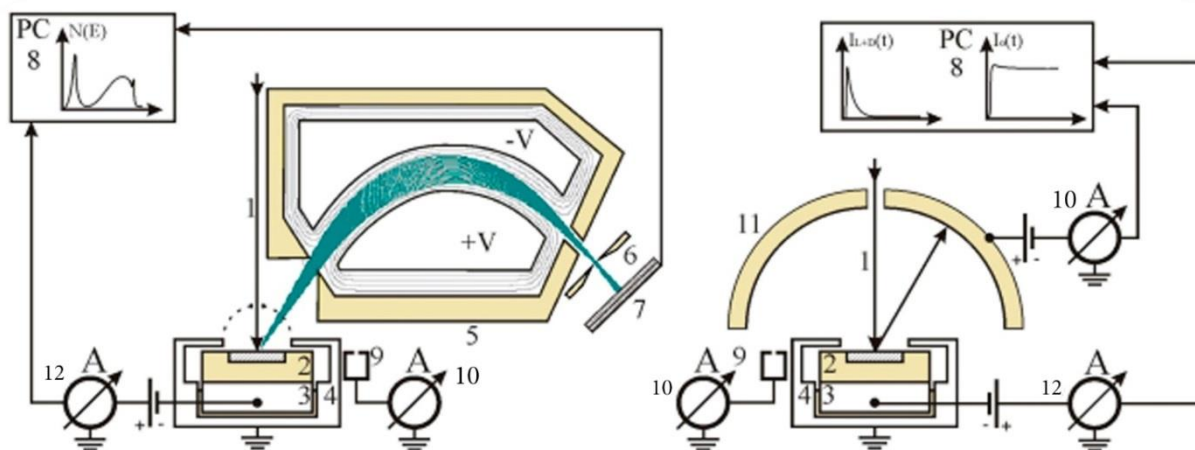


Рис. 2 - Схема экспериментальной установки для изучения зарядки алмаза. Справа – для снятия токов I_D , I_L , слева – для снятия поверхностного потенциала $V_s(t)$. 1 – электронный зонд РЭМ, 2 – диэлектрическая мишень, 3 – металлическая подложка образца, 4 – защитный экранирующий корпус, 5 – сектор тороидального электронного спектрометра, 6 – выходная диафрагма, 7 – МКП, 8 – управляющий ПК, 9 – цилиндр Фарадея, 10 – наноамперметр, 11 – усеченный полусферический коллектор электронов, 12 – электрометр.

Эмиссионная характеристика $I_c(t)$ фиксируется с помощью полусферического коллектора электронов 11. Последовательно в измерительную цепь была включена батарея, подающая напряжение +35 В на полусферу, что обеспечивало эффективную регистрацию тока эмитированных диэлектриком электронов. Одновременно с помощью электрометра 12 регистрируется изменение тока смещения I_D . Все токовые характеристики измеряются с помощью электрометра Keithley-6514 и наноамперметра 10 Keithley-6485, позволяющие записывать данные на ПК непосредственно в процессе измерения. При исследовании в области низких энергий, когда предполагалась положительная или нулевая зарядки мишени, на подложку образца подавалось отрицательное смещение –30 В, которое

позволяло ВЭ, выходящим из образца, попадать в спектрометр. Ток первичного пучка электронов измерялся с помощью размещенного на столике цилиндра Фарадея 9.

ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАРЯДКИ АЛМАЗА

В данном разделе представлены основные результаты комплексного исследования параметров зарядки алмаза при электронном облучении. На рис. 3 представлены экспериментально полученные характеристики зарядки алмаза электронным пучком с энергией $E_0=1$ кэВ и током $I_0=1$ нА. Размер облучаемой области $S=100\times 100$ мкм², что дает плотность зондирующего тока $j_0=10^{-5}$ А/см².

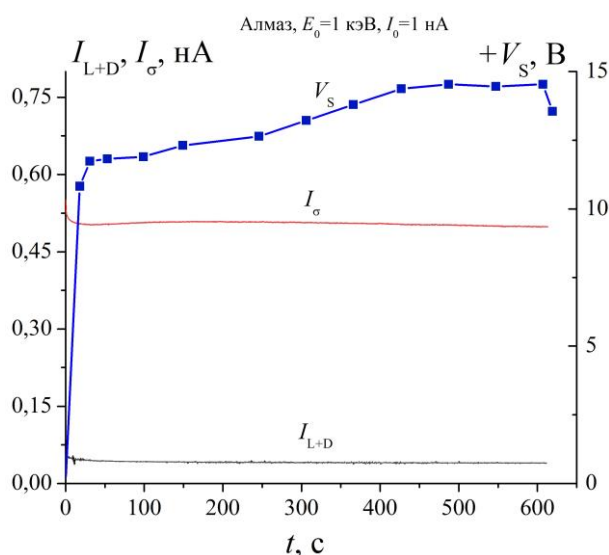


Рис. 3. Зарядовые характеристики алмаза при облучении электронами с энергией $E_0=1$ кэВ и током первичного пучка $I_0=1$ нА

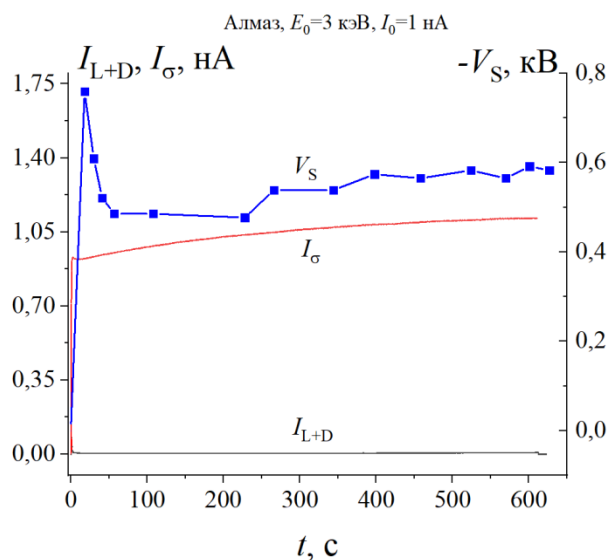


Рис. 4. Зарядовые характеристики алмаза при облучении электронами с энергией $E_0=3$ кэВ и током первичного пучка $I_0=1$ нА

Проанализировав графики, можно заметить, что потенциал зарядки V_S резко достигает значения $\approx +10$ В и достаточно плавно увеличивается в ходе зарядки до значения чуть менее +15В. Ток вторичной электронной эмиссии I_σ и суммарный ток смещения и утечки I_{L+D} в ходе эксперимента поддерживают равновесные значения порядка 0,5 нА и 0,04 нА соответственно. Стоит обратить внимание, что такое значение тока эмиссии является аномально

низким, так как для диэлектриков коэффициент вторично-электронной эмиссии быстро достигает значения $\sigma \approx 1$. Такое anomalно низкое значение объясняется наличием высокого положительного заряда вследствие вторичной электронной эмиссии. Этот положительный заряд удерживает или возвращает вторичные электроны на поверхность, уменьшая эффективное значение вторичной эмиссии.

При облучении алмаза электронами с энергией $E_0=3$ кэВ значение потенциала в начале зарядки резко достигло значения ~ -760 В. Как можно видеть на рис. 4, в дальнейшем потенциал претерпевает спад и ко времени $t=400$ с устанавливается равновесное состояние с $V_S \approx -600$ В. Ток вторичной электронной эмиссии плавно меняет своё значение от $0,9$ нА до $1,1$ нА, ток смещения и утечки поддерживает стабильное значение порядка 5 пА в ходе всего эксперимента. Резкий спад по абсолютному значению отрицательного потенциала в данном случае может объясняться усилением эмиссии вследствие отрицательного потенциала поверхности – эмиссия усиленная полем. В дальнейшем система плавно приходит в равновесие.

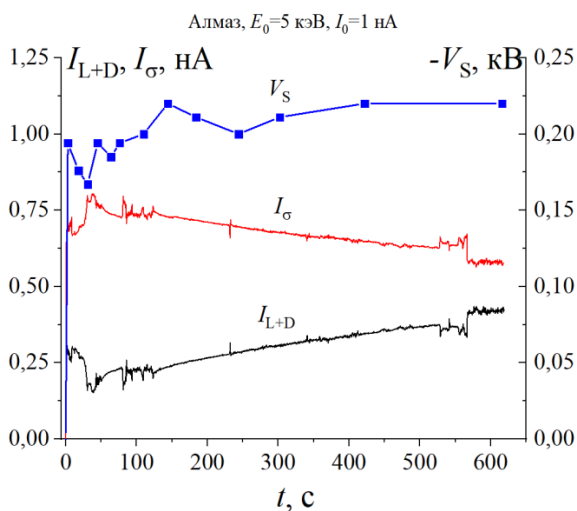


Рис. 5. Зарядовые характеристики алмаза при облучении электронами с энергией $E_0=5$ кэВ и током первичного пучка $I_0=1$ нА

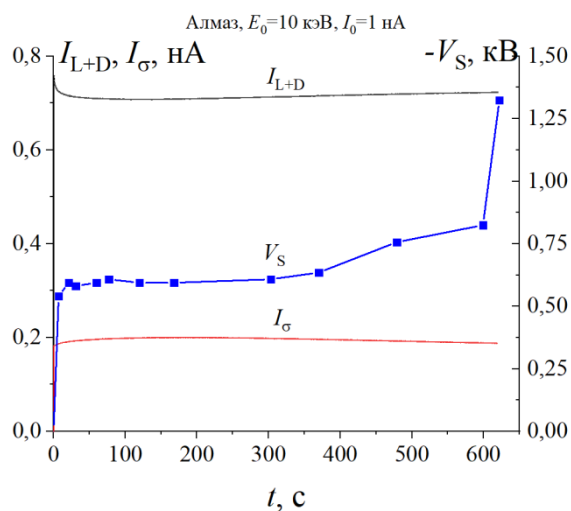


Рис. 6. Зарядовые характеристики алмаза при облучении электронами с энергией $E_0=10$ кэВ и током первичного пучка $I_0=1$ нА

Интересное поведение показывает ток смещения и утечки в опыте с энергией первичного пучка электронов $E_0=5$ кэВ (рис. 5). В предыдущих экспериментах стремящийся к нулю, в опыте с более высокой энергией он

достигает значения порядка 0,4нА и выше. Абсолютно симметричное ему поведение показывает ток вторичной электронной эмиссии, меняющий своё значение от 0,8нА до 0,6нА. Потенциал зарядки ведёт себя уже немного иначе, чем в предыдущих опытах, начиная немонотонный рост со значения -0,194кВ до равновесного значения -0,22кВ ко времени $t=150$ с. Такое резкое снижение потенциала объясняется сильным значением тока утечки.

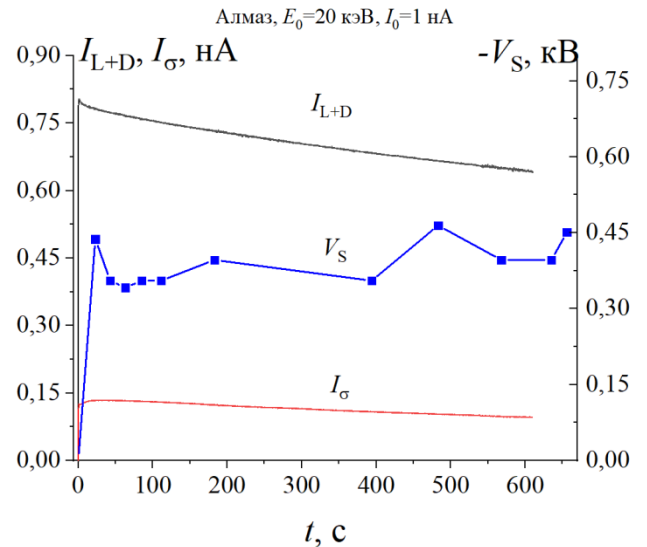
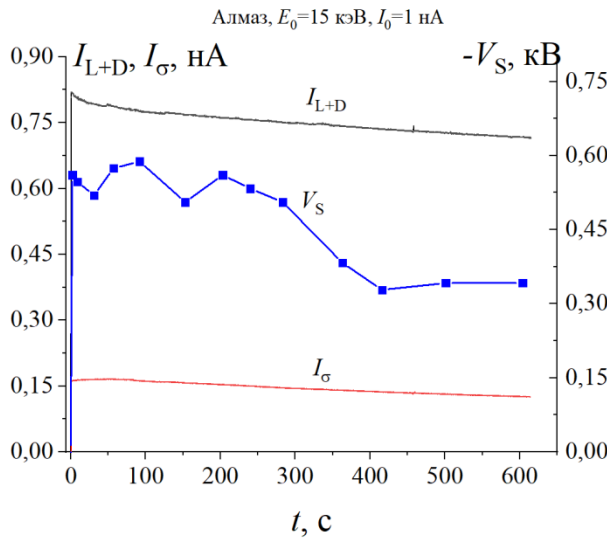


Рис. 7 - Зарядовые характеристики алмаза при облучении электронами с энергией $E_0=15$ кЭВ и током первичного пучка $I_0=1$ нА

Рис. 8 - Зарядовые характеристики алмаза при облучении электронами с энергией $E_0=20$ кЭВ и током первичного пучка $I_0=1$ нА

В случае облучения с энергиями $E_0=10$ кЭВ; 15кЭВ; 20кЭВ (рис. 6, 7, 8 соответственно) ток смещения и утечки достигает аномальных значений по сравнению с предыдущими опытами ($I_{L+D} \approx 0,7$ нА), аналогичное поведение показывает и ток вторичной электронной эмиссии лежащий в диапазоне от 0,15нА до 0,2нА. Потенциал зарядки в данных экспериментах показывает разные временные характеристики. При облучении электронами с энергией $E_0=10$ кЭВ (рис. 6) потенциал V_S с первых секунд выходит на плато равновесного значения $\approx 0,7$ кВ и поддерживает стабильный характер до середины эксперимента ($t=300$ с). Во второй половине эксперимента потенциал начинает возрастать до значения -0,82кВ и в самом конце эксперимента ($t=622$ с) резко возрастает до -1,32кВ. Но, к сожалению, из-за

технических проблем (не вовремя сгорел катод) данный эксперимент не был доведен до конца, но данная точка побудила интерес к проведению повторного опыта с большим временем облучения. Этот эксперимент является очень важным, так как резкий рост по абсолютному значению потенциала поверхности могло возникнуть из-за возникших радиационных дефектов, способных аккумулировать заряды. Проверка этой гипотезы будет сделана в дальнейшем.

При облучении пучком с энергией $E_0=15\text{кэВ}$ потенциал в первой половине эксперимента меняет свое значение в диапазоне от $0,5\text{кВ}$ до $0,6\text{кВ}$, после чего ($t=200\text{с}$) наблюдается монотонный спад и установление равновесного значения $V_S=-0,34\text{кВ}$. В случае облучения с энергией $E_0=20\text{кэВ}$ потенциал зарядки беспорядочно изменяется в диапазоне от $-0,34\text{кВ}$ до $-0,46\text{кВ}$ в течение всего эксперимента.

ВЫВОДЫ

Из полученных экспериментальных данных можно сделать следующие основные выводы:

1. При зарядке алмаза электронным пучком с относительно низким значением энергии $E_0 \leq 3\text{кэВ}$, важным фактором является высокое значение вторичной электронной эмиссии. Так при энергии $E_0=1\text{кэВ}$ измеренный потенциал зарядки составляет $\sim +15\text{В}$, что является очень высоким значением.
2. Для относительно высоких значений энергии заряжающих электронов сильное влияние оказывает ток утечки, и результирующий потенциал достигает относительно низких по абсолютному значению величин. Основной причиной столь высокого тока утечки может быть две: во-первых, из-за малого размера исследуемых образцов ($3 \times 3\text{ мм}^2$) значительный размер имеет ток утечки по поверхности. Второй причиной может являться малое количество дефектов, способных захватывать заряжающие электроны пучка, а следовательно электроны будут

расталкиваться свободным пространственным зарядом и баллистически проходить на подложку, внося вклад в ток утечки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olivier Torresina, Mario Borzob, Julien Mauchain, Ivan Blumb, Victor I. Kleshch, Alexander N. Obraztsov, Angela Vellac, Benoit Chalopina // Conduction mechanisms and voltage drop during field electron emission from diamond needles // Ultramicroscopy, Volume 202, July 2019, Pages 51-56.
2. Franz A. Koeck, Manpuneet Benipal, Robert J. Nemanich // Electrical contact considerations for diamond electron emission diodes // Diamond & Related Materials.
3. Bernhard Grotz, Moritz V. Hauf, Markus Dankerl, Boris Naydenov, Sébastien Pezzagna, Jan Meijer, Fedor Jelezko, Jörg Wrachtrup, Martin Stutzmann, Friedemann Reinhard, Jose A. Garrido // Charge state manipulation of qubits in diamond // Nature Communications volume 3, Article number: 729, 2012.
4. Matthias Pfender, Nabeel Aslam, Patrick Simon, Denis Antonov, Gergo Thiering, Sina Burk, Felipe Favaro de Oliveira, Andrej Denisenko, Helmut Fedder, Jan Meijer, Jose A. Garrido, Adam Gali, Tokuyuki Teraji, Junichi Isoya, Marcus William Doherty, Audrius Alkauskas, Alejandro Gallo, Andreas Grüneis, Philipp Neumann, Jörg Wrachtrup // Protecting a Diamond Quantum Memory by Charge State Control // Nano Lett., 2017.
5. V. Sadovoy, V. Blank, D. Teteruk, S. Terentiev, N. Kornilov // HPHT Single Crystal Diamond Type IIB Growth Sector Influence on the Secondary Electron Emission Phenomenon // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2017, Vol. 11, No. 5