

СИНТЕТИЧЕСКИЕ АЛМАЗЫ СТМ «АЛМАЗОТ» – РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Н. М. Казючиц, М. С. Русецкий, Е. В. Наумчик, В. Н. Казючиц

Белорусский государственный университет, kazuchits@bsu.by

Алмаз характеризуется широким спектром уникальных свойств, которые делают этот материал перспективным для изготовления электронных приборов, работающих в экстремальных условиях. Использование для этих целей природных алмазов ограничено разнообразием добываемого сырья, и, следовательно, необходимостью отбора кристаллов требуемого качества. Среди синтетических алмазов только выращенные CVD методом гомоэпитаксиальные пленки имеют совершенную структуру и заданный уровень легирования. Технология синтеза алмазов методом НРНТ не позволяет полностью управлять дефектно-примесным составом кристаллов. Для создания электронных приборов на основе НРНТ алмазов требуются предварительные исследования и отбор исходных кристаллов.

В данной работе приведены краткие результаты исследований отечественных синтетических алмазов марки СТМ «Алмазот» и приборных структур на их основе.

Базовая технология синтеза СТМ «Алмазот» описана в [1]. При синтезе алмазов методом НРНТ октаэдрические сектора роста захватывают больше технологических примесей, чем кубические. Вследствие этого в СТМ «Алмазот» примеси и дефекты распределены неоднородно [1-3]. Это видно [2] из топограмм желтой окраски, обусловленной изолированной примесью азота (С-дефектами) и желто-зеленой фотолюминесценции, связанной с примесью никеля. Практически во всех кристаллах СТМ «Алмазот» можно выделить три области (см. вставку рисунке 1а), различающиеся примесно-дефектным составом: 1 – призатравочная область в центральной части кристалла, 2 – периферийная область с октаэдрическими секторами роста, 3 – прилегающие к вершинам кристалла области с кубическими секторами роста. Ниже приведены результаты исследования этих областей.

Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) является стандартным методом оценки качества алмазов. Как видно из рисунка 1а, спектр КРС состоит из одной линии с максимумом 1332 см^{-1} . Смещение этой линии в разных частях СТМ «Алмазот» не превышает $\pm 0.02\text{ см}^{-1}$, в то же время, спектральная ширина линии 1332 см^{-1} меняется в зависимости от области возбуждения и определяется содержанием азота [4]. В бесцветных областях (3) ширина линии равна $1,57\text{ см}^{-1}$, в областях (1) и (2) – около $1,83\text{ см}^{-1}$. В структурно совершенных кристаллах природного алмаза типа Па она равна $1,5\text{ см}^{-1}$ [4, 5].

Люминесцентная спектроскопия позволяет установить характер распределения дефектов в СТМ «Алмазот». Спектры катодолюминесценции из призатравочной области (кривая 1 на рис. 1 б) содержат связанные с никелем узкие линии в окрестности 484, 884 нм и связанные с азот-вакансионными дефектами центры 503 нм (N-V-N) и 575 нм (NV⁰). В зависимости от режима синтеза дополнительно могут наблюдаться узкие бесфонные линии 489,4; 497,1; 523,5; 538, 727,5 и 793,7 нм (на рис. 1 б приведен спектр с центром 538 нм), которые связаны с более сложными дефектными комплексами вакансий с атомами азота и никеля [5]. Центр 884 нм имеет низкую интенсивность и может даже не наблюдаться в центральной части кри-

сталлов, так как отжигается при температурах синтеза. Центр 484 нм является более стабильным и не разрушается при этих температурах, но его интенсивность уменьшается, особенно при высоких концентрациях азота и никеля. Центры 503 и 575 нм являются проявлением процессов диффузии вакансий и агрегации азота в течение синтеза [5]. В спектрах из периферийных областей кристалла (кривая 2 на рис. 1 б) содержатся только интенсивные примесные центры 484 и 884 нм. Нет излучения, связанного со сложными структурными дефектами.

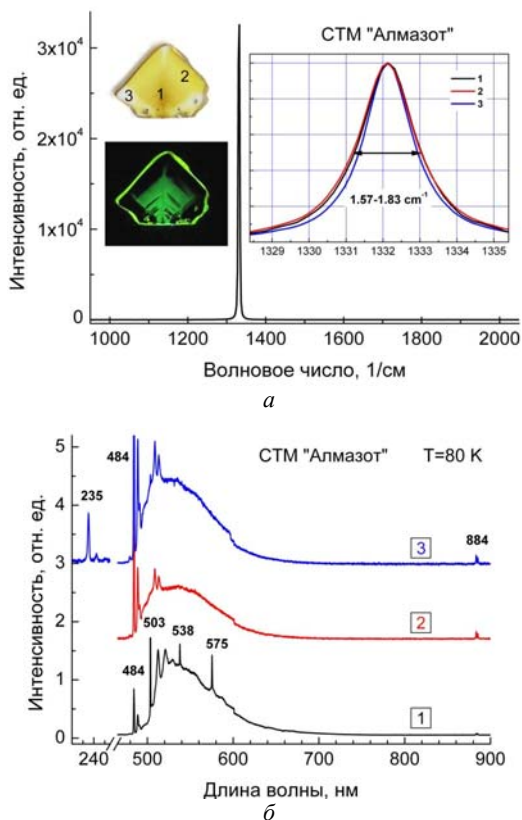


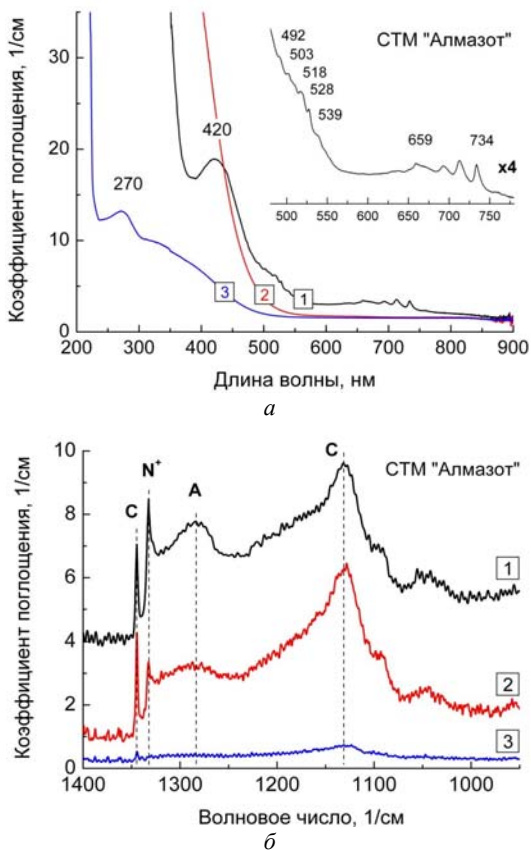
Рисунок 1. – Типичные спектры (а) – комбинационного рассеяния, (б) – катодолуминесценции кристаллов СТМ «Алмазот»:
1 – в призатравочной области,
2 – на периферии в октаэдрических секторах роста,
3 – при вершинах в кубических секторах роста.

На вставке – фотографии пластины при освещении белым светом и ультрафиолетовым

В кубических секторах роста с пониженным содержанием азота (кривая 3 на рис. 1 б) наряду с центрами 484, 884 нм наблюдается излучение 235 нм свободных экситонов. Излучение свободных экситонов является свидетельством высокого структурного совершенства и пригодности алмазов для электронного приборостроения [5].

Типичные спектры поглощения разными областями СТМ «Алмазот» приведены на рисунке 2. Бесцветные области 3 в кубических секторах роста характеризуются минимальным поглощением. В УФ-видимой области спектра (кривая 3 на рис. 2а) связанное с С-дефектами поглощение начинается в окрестности 500 нм и имеет мак-

симум на длине волны 270 нм. Резкий рост коэффициента поглощения при длинах волн короче 225 нм соответствует межзонным электронным переходам. В ИК области спектра (кривая 3 на рис. 2 б) С-дефектам соответствуют линии поглощения с максимумами 1130 и 1345 см^{-1} . Обычно концентрация С-дефектов в бесцветных областях составляет менее 3–6 ppm.



**Рисунок 2. – Типичные спектры поглощения кристаллами СТМ «Алмазот» – (а) – в УФ-видимой, (б) – ИК областях:
1 – в призатравочной области,
2 – на периферии в октаэдрических секторах роста,
3 – на периферии при вершинах в кубических секторах роста**

Концентрация азота на периферии в желтых октаэдрических секторах роста 2 составляет около 200 ppm. Соответственно в УФ-видимой области спектра (кривая 2 на рис. 2а) виден только край поглощения С-дефектами в окрестности 500 нм. Структура спектра поглощения в ИК области (кривая 2 на рис. 2б) является типичной для алмазов типа Ib. Индикатором присутствия примеси никеля в кристаллах является N^+ -линия (1332 см^{-1}), связанная с ионизованными С-дефектами. N^+ -линия появляются в спектрах алмазов с акцепторами (бор, никель, радиационные нарушения), которые захватывают слабо связанный пятый электрон замещающего азота [5]. Центральная часть кристалла в течение синтеза длительное время находилась в условиях термодиффузионной агрегации С-дефектов в А-дефекты. В спектрах ИК поглощения

(кривая 1 на рис. 2 б) это отразилось в дополнительной линии поглощения А-дефектами (1282 см^{-1}) и более интенсивной N^+ -линии. Концентрация азота в приэпитаксиальной области более 400 ppm, никеля – 20–30 ppm. Об агрегации азота в центральной части кристалла свидетельствуют также поглощение в УФ-видимой области спектра (кривая 1 на рис. 2а). Край поглощения сместился в коротковолновую сторону, появились широкая полоса при 420 нм и множество узких линий на участках 460-580 нм и 620-780 нм, связанных с Ni-содержащими дефектами [5].

Проведенные исследования [1-3] позволили установить корреляцию между примесно-дефектным составом кристаллов и основными эксплуатационными характеристиками алмазных детекторов и терморезисторов [6]. На рисунке 3а показана зависимость величины фототока от концентрации азота в СТМ «Алмазот». Рост фототока приблизительно обратно пропорционален квадрату концентрации азота. Типичные спектральные характеристики «солнечные слепых» фотоприемников на основе СТМ «Алмазот» приведены на рисунке 3б. Спектры содержат коротковолновую (менее 230 нм) область собственной фотопроводимости и более длинноволновую область примесной фотопроводимости. Областям кристалла с пониженным содержанием азота соответствует высокая фоточувствительность. Для таких областей отношение сигналов в УФ и видимой областях спектра составляет 5–6 порядков величины.

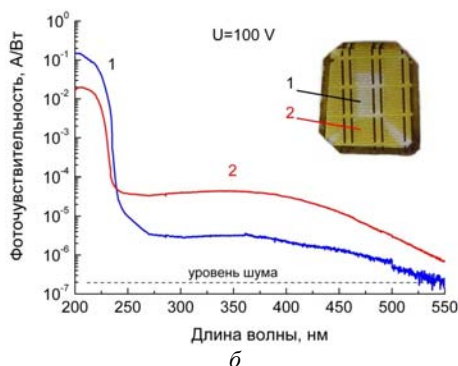
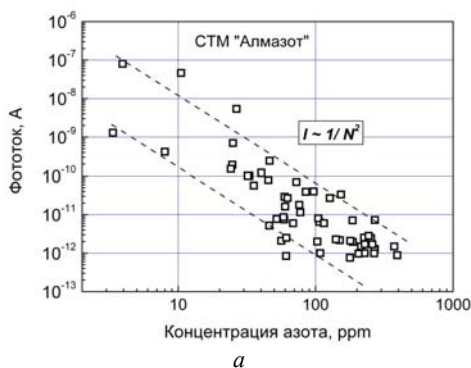
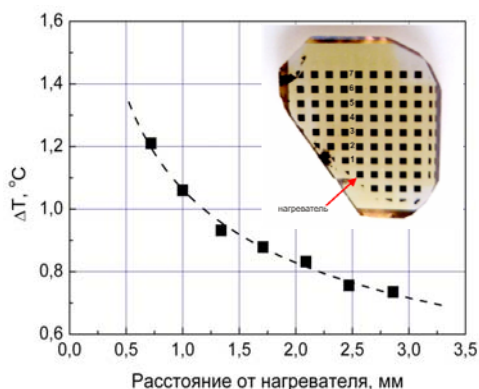
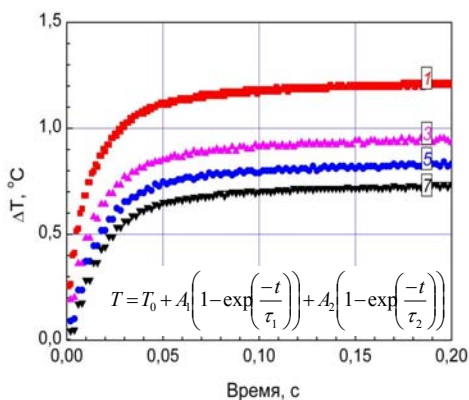


Рисунок 3. – Зависимость величины фототока от концентрации азота в СТМ «Алмазот» (а), типичные спектры фотопроводимости СТМ «Алмазот» с низким (кривая 1) и высоким (кривая 2) содержанием азота (б). На вставке показана фотография тестовой структуры

Характеристики встроенных в алмазный теплоотвод терморезисторов исследовали в условиях, имитирующих эксплуатацию мощных полупроводниковых приборов [7]. Пластину СТМ «Алмазот» с терморезисторами (см. вставку на рис. 4 а) устанавливали на медный радиатор. Тепловыделение от работающего прибора мощностью 0,7 Вт имитировала одна из контактных площадок терморезистора размером 200×200 мкм, которую использовали в качестве нагревателя. Матрица терморезисторов вокруг нагревателя позволяла исследовать распределение температуры вдоль поверхности алмазного теплоотвода. Температура перегрева алмазного теплоотвода относительно равновесной температуры окружения показана на рисунке 4 а. В окрестности источника тепла перегрев составлял всего 1,8 °С, а перепад температуры вдоль поверхности теплоотвода не превышал 1,0 °С. На рисунке 4 б приведены кинетики разогрева алмазного теплоотвода на различных расстояниях от «точечного» нагревателя. Кинетики содержат быструю (10 мс) и медленную (450 мс) составляющие, связанные с нагревом алмазной пластины и медного радиатора, соответственно.



а



б

Рисунок 4. – Перегрев алмазного теплоотвода относительно комнатной температуры на различных расстояниях от нагревателя мощностью 0,7 Вт (а), на вставке показана фотография алмазной пластины с терморезисторами; кинетики разогрева алмазного теплоотвода на различных расстояниях от «точечного» нагревателя (б), на вставке – выражение для аппроксимации

Изготовленные из специально отобранных кристаллов СТМ «Алмазот» датчики температуры, детекторы ионизирующих и УФ излучений имеют высокие эксплуатационные характеристики, сопоставимые с характеристиками лучших аналогов на основе природных алмазов типа IIa [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние условий синтеза на примесный состав монокристаллов алмаза марки СТМ «Алмазот» / Н.М. Казючиц [и др.] // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 1449–1461.
2. Методика визуальной оценки распределения примесей и дефектов в синтетических HPHT алмазах. / Н.М. Казючиц [и др.] // Актуальные проблемы современных наук [Электронный ресурс] – 2012. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/17_AVSN_2012/Physica/2_112864.doc.htm. – Дата доступа: 25.01.2013.
3. Lateral scan profiles of the recombination parameters correlated with distribution of grown-in impurities in HPHT diamond / E. Gaubas [et al.] // Diamond and related materials. – 2014. – Vol. 47. – P. 15–26
4. Effect of nitrogen impurities on the Raman line width in diamonds / N V Surovtsev [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter – 1999. – Vol. 11. – P. 4767–4774.
5. Zaitsev, A.M. Optical Properties of Diamonds: A Data Handbook / A.M. Zaitsev – Berlin: Springer, 2001. – 502 p.
6. Чувствительные элементы на основе синтетического алмаза для контрольно-измерительных приборов АЭС / Н.М. Казючиц [и др.] // Доклады БГУИР – 2015. – № 2 (88). – С. 139–143.
7. Теплоотвод на основе алмаза со встроенным датчиком температуры / В.А. Мартинович [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – Т. 18. – № 4. – С. 209–214.

ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК

В. С. Костко

Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина, kostko@brsu.brest.by

Аннотация. Методами электронной оже-спектроскопии обнаружены и исследованы диффузионные процессы в светочувствительной структуре SnI₂-Cd-стекло.

Тонкопленочные структуры полупроводник-металл-диэлектрик, в которых в качестве полупроводника используется SnI₂, представляют практический интерес с целью нанесения металлического изображения на диэлектрическую поверхность, получения позитивно-негативных изображений, определения квантового выхода ионов металла в полупроводник. Соответствующие способы запатентованы [1–3].

На примере тонкопленочной светочувствительной структуры SnI₂-Cd-стекло методом электронной оже-спектроскопии установлено взаимное проникновение частиц металлического и полупроводникового слоев.

Структура изготавливалась последовательным термическим вакуумным (10⁻⁵ мм рт. ст.) напылением на диэлектрическую подложку (стекло) слоя кадмия (в пределах 10–50 нм) и слоя полупроводника SnI₂ (от 50 до 300 нм).

Одной из самых распространенных методик анализа поверхности и границы раздела тонкопленочных структур является электронная оже – спектроскопия (далее ЭОС) [4–6]. Для получения информации о распределении химических элементов по глубине, и, в частности, о промежуточном слое светочувствительной структуры