

УДК 621.386.82: 621.921.34

## ДЕТЕКТОРЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК

В. Ф. Дворянкин<sup>1</sup>, А. А. Кудряшов<sup>1</sup>, В. Г. Ральченко<sup>2</sup>

*Измерены коэффициент пропускания и фототок при облучении рентгеновским излучением с энергией до 50 кэВ поликристаллических алмазных пленок толщиной 3 – 660 мкм. Алмазные пленки перспективны для создания рентгеновских детекторов, в том числе проходного типа – обладающих малым поглощением для регистрируемых квантов.*

К алмазу, как материалу для создания детекторов радиационного излучения, внимание было привлечено еще более 50 лет назад [1, 2]. К преимуществам алмаза относятся: а) высокое удельное сопротивление ( $10^{11} - 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ), что обеспечивает низкие темновые токи и токи утечки; б) нечувствительность к свету видимого диапазона (граница фундаментального поглощения равна 225 нм), в) работоспособность при высоких температурах; г) высокие радиационная стойкость и химическая инертность; д) малое, порядка 1 нс, время сбора носителей заряда, что важно для регистрации импульсов излучения.

Небольшие размеры (обычно несколько мм), неконтролируемый набор дефектов и примесей, и, наконец, высокая цена природных монокристаллов алмаза ограничивают их применение в качестве детекторного материала. Искусственные кристаллы алмаза, синтезируемого при высоких давлениях, имеют во многом те же недостатки, в частности содержат примеси металлов-катализаторов. С появлением технологии выращивания алмазных пленок и пластин из газовой фазы стало возможным создание радиационных

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино.

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва.

детекторов с воспроизводимыми свойствами, больших размеров и менее дорогих [3]. Ввиду малого атомного номера углерода ( $Z = 6$ ) поглощение рентгеновского излучения в алмазе невелико по сравнению с другими полупроводниками, что делает возможным конструирование полупрозрачных in-line детекторов для измерения потока и положения рентгеновских пучков [4, 5]. В настоящей работе измерены коэффициент пропускания и чувствительность к рентгеновскому излучению алмазных пленок, осажденных в двух типах разрядов.

*Методика эксперимента.* Поликристаллические алмазные пленки толщиной 3 – 660 мкм (размер зерна 1 – 150 мкм) выращивались на кремниевых подложках из газовых смесей  $CH_4/H_2$  в дуговом разряде [6] и в микроволновой плазме [7]. Алмазные мембраны (свободные пленки) толщиной  $< 60$  мкм получали химическим травлением окна через маску диаметром 6 мм в подложке. В случае более толстых пленок (пластин) подложка удалялась полностью.

Источником рентгеновского излучения служила рентгеновская трубка с вольфрамовым анодом. Высокое напряжение  $U_a$  и анодный ток  $j$  трубки (ток электронов на мишень) изменялись в интервалах 8 – 50 кВ и 0.5 – 15 мА, соответственно. Потенциал возбуждения характеристического спектра для вольфрама составляет 69.3 кВ, поэтому рентгеновский спектр излучения трубки при указанных анодных напряжениях непрерывный. Спектральный состав тормозного излучения  $I(\lambda)$  можно представить [8] в виде:

$$I(\lambda) = CjZ(\lambda - \lambda_{min})(\lambda^3 \lambda_{min})^{-1} \exp[-\alpha_{Be}(\lambda)t], \quad (1)$$

где  $\lambda_{min}$  (Ангстрем) =  $12.4/U_a$  (кВ) – коротковолновый предел спектра,  $C$  – константа. Здесь спектральное распределение скорректировано на поглощение выходного окна из бериллия толщиной  $t = 0.5$  мм, коэффициент поглощения  $\alpha_{Be}(\lambda)$  которого взят из таблиц [9]. Рассчитанные по ф-ле (1) и нормализованные по интенсивности спектры для  $U_a = 20$  кВ и 50 кВ показаны на рис. 1. В частности, со стороны коротких длин волн излучение ограничено значениями  $\lambda_{min} = 0.25 \text{ \AA}$  и  $0.62 \text{ \AA}$  для  $U_a = 50$  и  $U_a = 20$  кВ, соответственно. Интегральная по спектру интенсивность тормозного излучения  $I \sim jU_a^2$ .

Образцы устанавливались на расстоянии 10 см от выходного окна рентгеновской трубки. Коэффициент пропускания излучения пленок  $T$  находили из отношения показаний калиброванного GaAs рентгеновского детектора, регистрирующего поток в присутствии образца, размещенного вплотную перед детектором, и в отсутствие образца. Полученные значения  $T$  сравнивали с теоретическими, рассчитанными для толщины

пленки  $x$  на основе известных коэффициентов экстинкции рентгеновских квантов  $\mu(C)$  для углерода [9]:

$$T(x) = \int_{\lambda_{min}}^{\infty} I(\lambda) \exp(-\mu(\lambda)x) d\lambda / \int_{\lambda_{min}}^{\infty} I(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

В рассматриваемом диапазоне энергий коэффициент экстинкции  $\mu = \mu_a + \mu_s$  является суммой вкладов фотоэлектрического и комптоновского поглощения  $\mu_a$  и упругого рассеяния  $\mu_s$ , причем последний член преобладает при  $\lambda < 0.6 \text{ \AA}$ . (рис. 2).

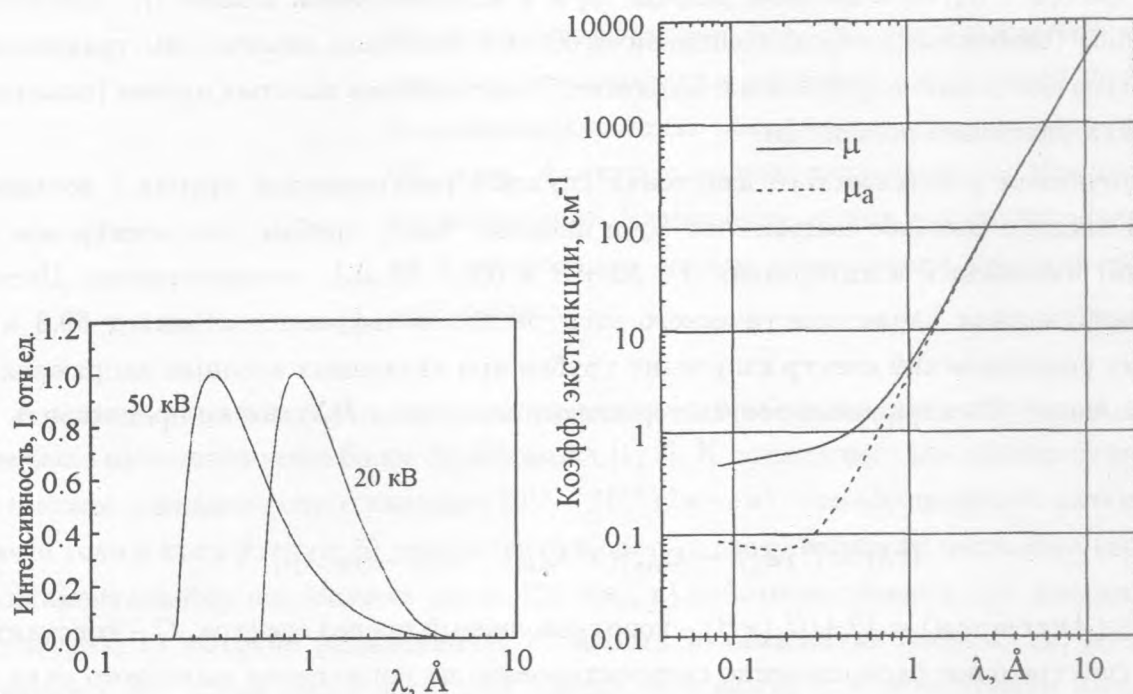


Рис. 1. Нормализованные по интенсивности расчетные спектры излучения  $I(\lambda)$  рентгеновской трубки при анодном напряжении  $U_a = 20 \text{ кВ}$  и  $50 \text{ кВ}$ .

Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения  $\mu_a$  (пунктир) и коэффициента экстинкции  $\mu$  (сплошная линия) алмаза от длины волны рентгеновского излучения [9].

Расчетные и близкие к ним экспериментальные зависимости пропускания  $T$  излучения от толщины алмазной пленки для значений анодного напряжения 20 и 50 кВ показаны на рис. 3. Так, для  $U_a = 50 \text{ кВ}$  расчетные значения  $T$  составляют 98.7% при толщине  $x = 10 \text{ мкм}$  и 68% при  $x = 1 \text{ мм}$ . Высокая прозрачность алмазных мембран

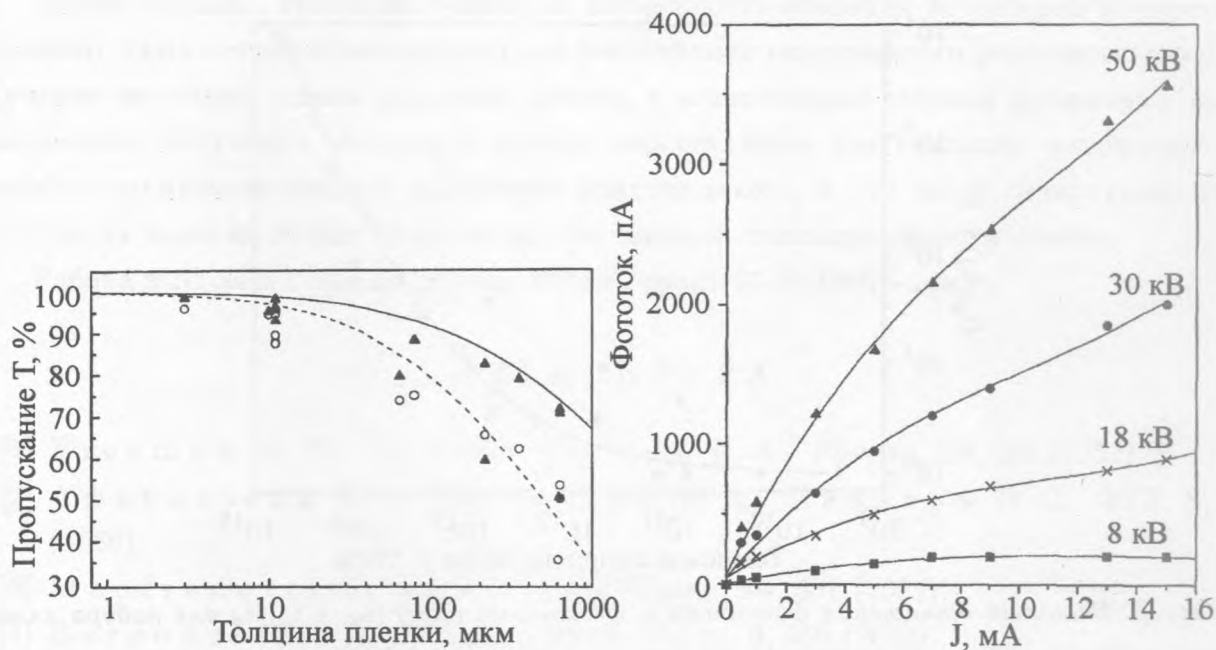


Рис. 3. Зависимости пропускания  $T$  излучения от толщины алмазной пленки для анодного напряжения  $U_a = 20$  кВ (расчет – пунктирная линия, эксперимент – кружки) и  $U_a = 50$  кВ (расчет – сплошная линия, эксперимент – треугольники).

Рис. 4. Фототок алмазной мембраны толщиной 11  $\mu\text{м}$  в зависимости от тока рентгеновской трубки  $j$  при анодном напряжении  $U_a$ : 8, 18, 30 и 50 кВ. Поле между электродами  $E = 9 \cdot 10^3$  В/см.

при достаточной прочности при толщинах порядка 10  $\mu\text{м}$  позволяет конструировать детекторы проходного типа.

Для измерения фототока, индуцированного рентгеновским излучением, использовали схему металл-полупроводник-металл: на поверхность мембран или пластин с двух сторон наносились контакты из  $Ti/Au$  или коллоидного углерода (аквадаг) диаметром 3 мм, на них подавали напряжение смещения 10 В. Зависимости фототока  $i_{ph}$  алмазной мембраны толщиной 11  $\mu\text{м}$  от величины тока рентгеновской трубки при различных анодных напряжениях приведены на рис. 4. При приложенном между электродами поле  $E = 9 \cdot 10^3$  В/см темновой ток  $i_d$  составлял 100 нА, а максимальный фототок  $i_{ph} = 3.6$  мА ( $i_{ph}/i_d = 36$ ) при  $U_a = 50$  кВ,  $j = 15$  мА. С понижением анодного напряжения (т.е. при низких интенсивностях и больших длинах волн) наблюдается насыщение фототока.

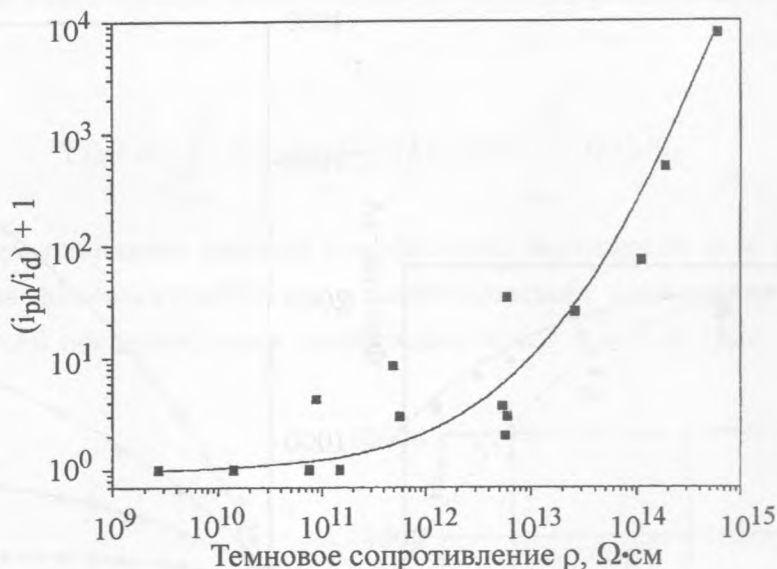


Рис. 5. Величина отношения фототока к темновому току  $(i_{ph} + i_d)/i_d$  для набора алмазных пленок с различной величиной удельного темнового сопротивления  $\rho$  при неизменных условиях облучения ( $U_a = 50$  кВ,  $j = 10$  мА).

Мерой совершенства и чистоты алмаза может быть величина его удельного сопротивления  $\rho$ , которая максимальна для наименее дефектных образцов. Простая оценка дает отношения фототока к темновому току  $i_{ph}/i_d = \rho q \mu_c \tau N$ , где  $\mu_c \tau$  – усредненное (для электронов и дырок) произведение подвижности и времени жизни носителей заряда,  $q$  – единичный заряд, и  $N$  – концентрация электронно-дырочных пар, рождаемых в детекторе рентгеновскими квантами в единицу времени. На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость отношения  $(i_{ph} + i_d)/i_d$  при фиксированном потоке излучения от удельного сопротивления образца из набора пленок различной толщины, у которых величина  $\rho$  лежит в диапазоне от  $3 \cdot 10^9$  до  $5 \cdot 10^{14}$  Ом·см. Фототок превышает темновой ток лишь при достаточно высоких сопротивлениях  $\rho > 10^{11}$  Ом·см. Отношение  $i_{ph}/i_d$  возрастает с  $\rho$  (максимальная величина  $i_{ph}/i_d = 8 \cdot 10^3$  зарегистрирована для пленки толщиной 180 мкм), но нелинейно, что указывает на увеличение произведения  $\mu_c \tau$  в более изолирующем, т.е. в менее дефектном материале. Из данных по фотоотклику на наносекундные импульсы ArF эксимерного лазера ( $\lambda = 193$  нм) для лучших наших пленок [10] получена оценка  $\mu_c \tau = 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/В. Полагая  $\tau = 1$  нс, имеем оценку  $\mu_c = 1000$  см<sup>2</sup>/Вс, что примерно вдвое ниже величины для подвижности электронов  $\mu_e = 2200$  см<sup>2</sup>/Вс в монокристаллах алмаза [2].

Таким образом, продемонстрирована возможность создания детекторов фоторезистивного типа металл-алмаз-металл для регистрации непрерывного рентгеновского излучения на основе тонких алмазных пленок, в значительной степени прозрачных для падающего излучения. Алмазные пленки перспективны для создания матричных и позиционно-чувствительных детекторов рентгеновского, в том числе синхротронного, излучения высоких интенсивностей за счет высокой теплопроводности пленок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 05-02-08076-офи\_э.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Freeman G. P., Van der Velden H. A. *Physica*, **19**, 565 (1952).
- [2] Афанасьева Е. А., Конорова Е. А., Вавилов В. С. *ФТТ*, **8**, 3 (1966).
- [3] Manfredotti C. *Diamond Relat. Mater.*, **14**, 531 (2005).
- [4] Bergonzo P. et al. *Diamond Relat. Mater.*, **9**, 960 (2000).
- [5] Dabagov S. B. et al. in: *Detectors for Crystallography and Diffraction Studies at Synchrotron Sources*, SPIE Proc., **3774**, 122 (1999).
- [6] Nistor L. C., Van Landuyt J., Ralchenko V. G., et al. *J. Mater. Res.*, **12**, 2533 (1997).
- [7] Ralchenko V. G., Smolin A. A., Конов V. I., et al. *Diamond Relat. Mater.*, **6**, 417 (1997).
- [8] Иванов С. А., Шуккин Г. А. *Рентгеновские трубки технического назначения*, Л., Энергоатомиздат, 1989.
- [9] Немец О. Ф., Гофман Ю. В. *Справочник по ядерной физике*, Наукова Думка, Киев, 1975.
- [10] Nochedez J-F. et al. *Diamond Relat. Mater.*, **10**, 673 (2001).

Поступила в редакцию 30 марта 2006 г.