

# Фоточувствительность алмазного детектора к лазерному излучению в диапазоне 220 – 355 нм

Е.И.Липатов\*, А.Н.Панченко\*, В.Ф.Тарасенко\*, Дж.Шейн\*\*, М.Кришнан\*\*

*Исследована фоточувствительность детекторов лазерного излучения на основе природного алмаза типа IIa компании AASC (США) для длин волн 222, 308, 337 и 353 нм. Определены предельные интенсивности УФ лазерного излучения, до которых обеспечивается линейный режим работы данных детекторов (0.5–4 МВт/см<sup>2</sup>).*

**Ключевые слова:** алмаз, фотодетектор, лазерное излучение, ультрафиолет.

## 1. Введение

В настоящее время природный алмаз привлекает внимание ряда исследователей как материал для создания детекторов спонтанного рентгеновского [1] и УФ лазерного излучения [2]. Этот интерес обусловлен уникальностью свойств данного материала [3–7]. Природный алмаз является самым твердым минералом из известных в природе. При нормальных условиях он инертен ко многим агрессивным химическим реактивам, например к царской водке и плавиковой кислоте. Теплопроводность природного алмаза  $(1.5 - 2.0) \cdot 10^3$  Вт/К·м втрое превышает теплопроводность меди. Ширина запрещенной зоны этого материала составляет  $\sim 5.5$  эВ, что обеспечивает его высокое удельное сопротивление (более 1 ГОм·м) и напряжение пробоя  $\sim 1$  ГВ/м. Кроме того, природный алмаз обладает высокой лучевой стойкостью (в УФ диапазоне его порог разрушения превышает 50 МВт/см<sup>2</sup>).

Вышеперечисленные свойства делают природный алмаз перспективным материалом для создания фотодетекторов лазерного излучения.

Следует также отметить, что в последнее время активно исследуется синтетический алмаз, получаемый различными методами, и детекторы, которые создаются на его основе [5–7]. Однако современные фотодетекторы на основе синтетического алмаза характеризуются низкой лучевой стойкостью и малым фототоком, что ограничивает диапазон интенсивностей, в котором они могут быть использованы, и их спектральную чувствительность.

В настоящей работе экспериментально изучена чувствительность детектора на основе природного алмаза типа IIa, разработанного в компании Alameda Applied Science Corporation (США), к УФ лазерному излучению в диапазоне 222–353 нм.

## 2. Экспериментальная установка и методика измерений

На рис.1 представлена схема экспериментальной установки. Лазерный импульс генерировался универсальным лазером 1 (Фотон-2), разработанным в Лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН [8]. Часть лазерной энергии отводилась светоделительной пластиной 2 для контроля формы импульса вакуумным фотодиодом ФЭК-22. Для увеличения интенсивности излучение, которым облучался алмазный детектор 3, фокусировалось линзой 4 с фокусным расстоянием  $f = 10$  см. Интенсивность лазерного импульса, воздействующего на детектор, варьировалась с помощью светофильтров 5 либо путем смещения алмазного детектора относительно фокуса линзы. Энергия излучения, проходящего через диафрагму 6 с известными размерами ( $3 \times 1$  мм), измерялась калориметром ИМО-2Н.

Эквивалентная электрическая схема алмазного фотодетектора изображена на рис.2. Конденсатор  $C_0 = 10$  нФ заряжался от источника постоянного напряжения до 250 или до 1000 В (в зависимости от геометрии фотодетек-

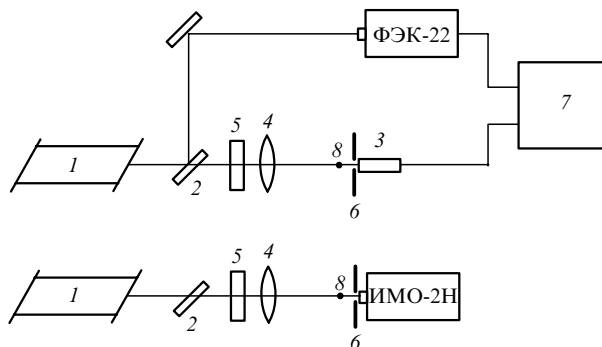


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – универсальный лазер; 2 – кварцевые пластины; 3 – алмазный детектор; 4 – собирающая линза; 5 – светофильтры; 6 – апертура; 7 – цифровой осциллограф; 8 – фокус линзы.

\*Институт сильноточной электроники РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп. 4; e-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru

\*\*Alameda Applied Sciences Corporation, San Leandro, CA 94577, USA

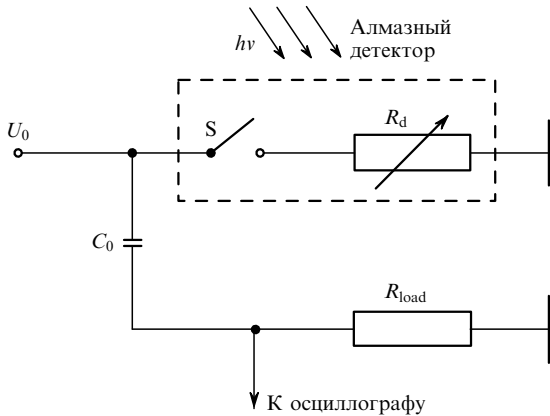


Рис.2. Эквивалентная электрическая схема алмазного фотодетектора:  $U_0$  – постоянное напряжение зарядки конденсатора  $C_0$ ;  $S$  – ключ, обозначающий резкое падение сопротивления алмаза под воздействием излучения;  $R_d$  и  $R_{load}$  – сопротивления алмаза и нагрузки соответственно. Импульс напряжения снимается с  $R_{load}$  и регистрируется осциллографом.

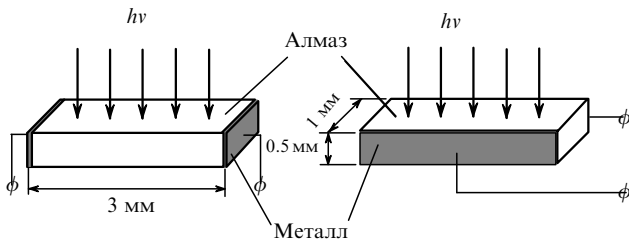


Рис.3. Внешний схематический вид алмазных фотодетекторов.

тора). При облучении детектора лазерным излучением в течение импульса наблюдалось резкое падение сопротивления кристалла (ключ  $S$ ), и конденсатор  $C_0$  разряжался через сопротивления алмаза  $R_d$  и нагрузки  $R_{load}$ . Сигнал на нагрузке регистрировался цифровым осциллографом 7 «Тектроникс» TDS-220. Пиковая мощность определялась из интегрирования сигнала с ФЭКа.

На рис.3 представлен схематичный вид алмазных фотодетекторов. Фактически это монокристалл природного алмаза типа Па с размерами  $3 \times 1 \times 0.5$  мм, размеры облучаемой поверхности составляют  $3 \times 1$  мм. Омический контакт обеспечивается металлизацией контактных граней. В первом случае фотодетектор имел межэлектродное расстояние 1 мм, что позволяло заряжать конденсатор  $C_0$  до напряжения 250 В. Во втором случае межэлектродное расстояние составляло 3 мм, что обеспечивало существенно более высокое зарядное напряжение – 1000 В.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В первых экспериментах исследовался алмазный фотодетектор с межэлектродным расстоянием 1 мм. Чувствительность фотодетектора измерялась для четырех длин волн: 222 (KrCl), 308 (XeCl), 337 ( $N_2$ ) и 353 нм (XeF).

На рис.4 представлены лазерные импульсы, полученные с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22 и алмазного фотодетектора. Искажение формы лазерных импульсов, регистрируемых алмазным фотодетектором, наб-

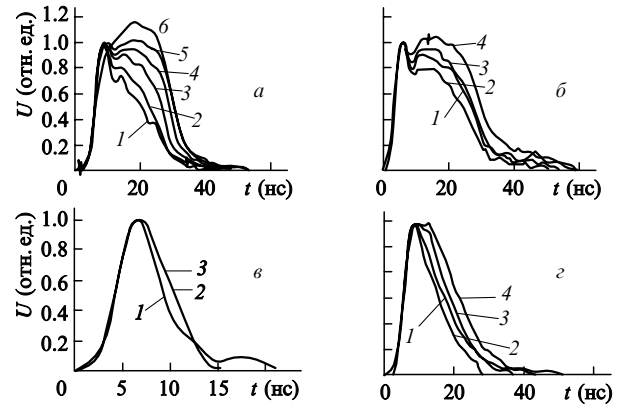


Рис.4. Лазерные импульсы, полученные с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22 и алмазного фотодетектора: а)  $\lambda = 222$  нм, сигнал с ФЭК-22 – 1 (длительность импульса по полувысоте 14.1 нс), сигнал с алмазного детектора – 2 (энергия 0.17 мДж, длительность импульса по полувысоте 16.4 нс), 3 (0.56 мДж, 20.6 нс), 4 (1.19 мДж, 22.7 нс), 5 (4.56 мДж, 24.4 нс), 6 (21.3 мДж, 23.0 нс); б)  $\lambda = 308$  нм, сигнал с ФЭК – 1 (23.8 нс), сигнал с алмазного детектора – 2 (2.2 мДж, 20.8 нс), 3 (5.3 мДж, 24.3 нс), 4 (19.0 мДж, 26.8 нс); в)  $\lambda = 337$  нм, сигнал с ФЭК – 1 (5.1 нс), сигнал с алмазного детектора – 2 (0.75 мДж, 6.3 нс), 3 (1.63 мДж, 6.3 нс); г)  $\lambda = 353$  нм, сигнал с ФЭК – 1 (12.3 нс), сигнал с алмазного детектора – 2 (1.9 мДж, 10.3 нс), 3 (7.3 мДж, 13.6 нс), 4 (8.5 мДж, 16.2 нс).

людается при интенсивности свыше  $2-4$  МВт/см<sup>2</sup> для длин волн 308, 337 и 353 нм и свыше  $0.5$  МВт/см<sup>2</sup> для длины волны 222 нм. При этом растет длительность импульса по полувысоте и искажается задний фронт импульса, однако его передний фронт остается неизменным. Следовательно, линейный режим работы данного фотодетектора ограничивается интенсивностью  $0.5-4$  МВт/см<sup>2</sup> в зависимости от длины волны.

На рис.5 и 6 представлены зависимости пикового тока и чувствительности фотодетектора от пиковой интенсивности излучения. С увеличением интенсивности воздействующего излучения пиковый ток, текущий через кри-

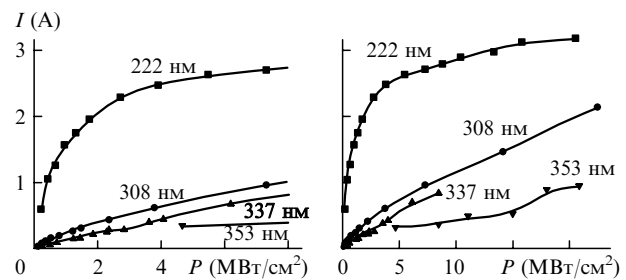


Рис.5. Зависимости пикового тока от пиковой интенсивности излучения.

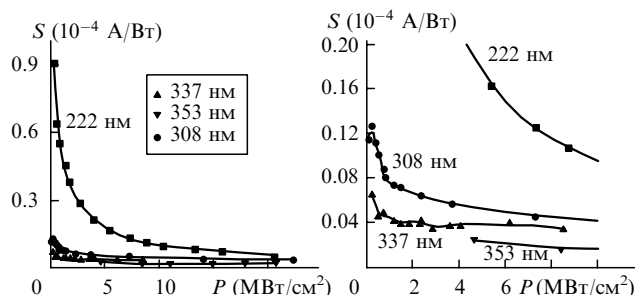


Рис.6. Зависимости чувствительности алмазного фотодетектора от пиковой интенсивности излучения.

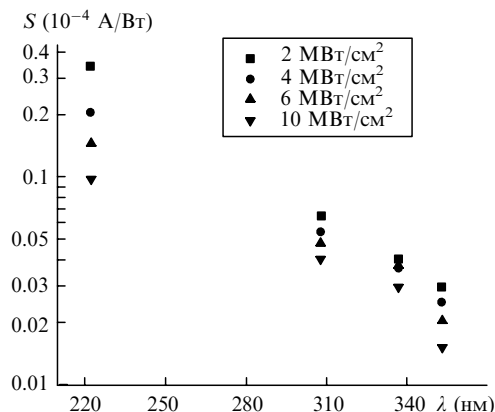


Рис.7. Спектральная зависимость чувствительности алмазного фотодетектора при разных интенсивностях воздействующего излучения.

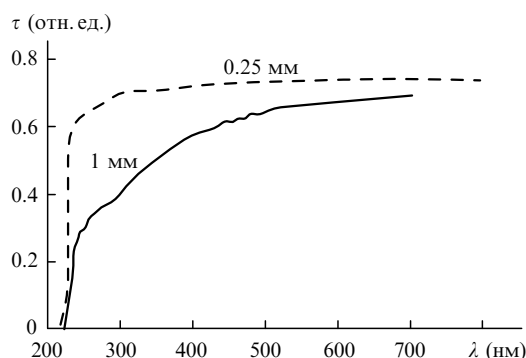


Рис.8. Спектры пропускания природного алмаза типа IIa для образцов разной толщины.

талл, растет, тогда как чувствительность фотодетектора уменьшается. Максимальный ток через алмазный фотодетектор составил 3.2 А при интенсивности 21 МВт/см<sup>2</sup> воздействующего излучения с длиной волны  $\lambda = 222$  нм. При этом чувствительность была равна  $5.1 \cdot 10^{-6}$  А/Вт. Максимальная чувствительность  $9.7 \cdot 10^{-5}$  А/Вт на длине волны  $\lambda = 222$  нм была получена при интенсивности 0.2 МВт/см<sup>2</sup>.

На рис.7 демонстрируется спектральная зависимость чувствительности алмазного фотодетектора для разных интенсивностей излучения. Нетрудно заметить, что с уменьшением длины волны фоточувствительность алмазного детектора растет. На рис.8 приведены спектры пропускания природного алмаза типа IIa в УФ и видимом диапазонах спектра. Непрерывная кривая, соответствующая алмазному образцу толщиной 1 мм, взята из литературных данных [4]. Штриховая кривая получена нами для алмаза типа IIa толщиной 0.25 мм с помощью

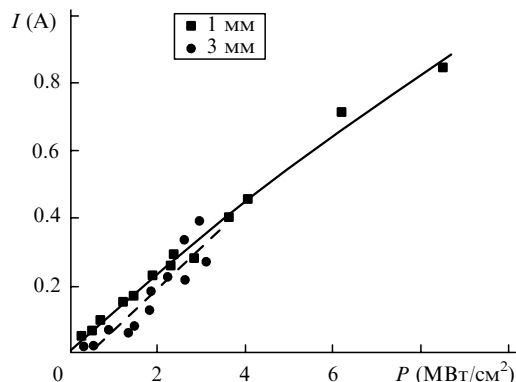


Рис.9. Зависимость пикового тока от пиковой интенсивности излучения на длине волны 337 нм для детекторов с межэлектродным зазором 1 и 3 мм.

спектрофотометров «Спекорд» М-40 и СФ-16. Спектральный диапазон менее 226 нм соответствует фундаментальному поглощению природного алмаза типа IIa (ширина запрещенной зоны алмаза 5.5 эВ). Это объясняет резкий рост чувствительности алмазного детектора на длине волны 222 нм, тогда как при больших длинах волн поглощение происходит, по-видимому, благодаря дефектам кристаллической решетки, образующим в запрещенной зоне разрешенные состояния.

В последующих экспериментах использовался детектор с межэлектродным расстоянием 3 мм. На рис.9 представлены зависимости пикового тока через фотодетекторы с межэлектродными зазорами 1 и 3 мм от интенсивности лазерного излучения с длиной волны 337 нм (N<sub>2</sub>). Видно, что зависимости для первого и второго детекторов практически совпадают, однако в первом случае зарядное напряжение на единицу длины кристалла составляет 250 В/мм, в то время как во втором – 333 В/мм.

Авторы благодарят Т.Н.Копылову за предоставленную возможность работы со спектрофотометром.

1. Spielman R.B. *Rev.Sci.Instrum.*, **63**, 5056 (1992).
2. Prasad R.R., Schein J., Gensler S.W., Krishnan M. *Proc. XII IEEE Pulsed Power Conf.* (Monterey, CA, 1999, p. 142–145).
3. Peter F. *Zs.Phys.*, **15**, 358 (1923).
4. Feldman A., Holly S. *Proc. SPIE. Diamond Optics* (San Diego, CA, 1988, v. 0969, p. 145).
5. Pace E., Di Benedetto R., Scuderi S. *Diamond and Related Mat.*, **9**, 987 (2000).
6. Gaudin O., Whitfield M.D., Foord J.S., Jackman R.B. *Diamond and Related Mat.*, **10**, 610 (2001).
7. Whitfield M.D., Lansley S.P., Gaudin O., McKeag R.D., Rizvi N., Jackman R.B. *Diamond and Related Mat.*, **10**, 715 (2001).
8. Верховский В.С., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **25**, 5 (1995).

## ПОПРАВКА

**В.И.Соколов.** Измерение малых искажений волнового фронта с помощью трехволнового интерферометра сдвига («Квантовая электроника», 2001, т. 31, № 10, с. 891–896).

В статье допущена следующая опечатка: на с.892 в 6-й и 7-й строках после формулы (10) вместо «... и отличной от нуля...» следует читать «... и равной нулю...».