

УДК 535.4

PACS: 42.79.Jq

## Дифракция оптического излучения на акустических волнах в алмазе

В. С. Фещенко, К. Н. Зяблук, В. А. Шепелев, Э. А. Сенокосов

*В данной работе теоретически исследовано взаимодействие лазерного излучения с длиной волны 650 нм с объёмной звуковой волной в составном акустическом резонаторе на алмазе на частоте 6 ГГц. Построена математическая модель этого взаимодействия и на её основании исследована дифракция Брэгга световой волны в алмазе. Было показано, что угол Брэгга в алмазе при дифракции на звуковой волне с частотой 6 ГГц составляет 6 градусов. Максимальная дифракционная эффективность (при длине взаимодействия света со звуком равной 2 мм и ширине пучка – 1 мм) достигается при акустической мощности 125 Вт. Ширина полосы модуляции звуковой волны в этих условиях равна 191,85 МГц. При уменьшении длины волны оптического излучения до 226 нм удалось расширить ширину полосы модуляции звуковой волны до 520,64 МГц. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что полоса пропускания в составном акустическом резонаторе на алмазе лимитируется именно акустооптическим взаимодействием, а не акустоэлектрическим.*

*Ключевые слова:* алмаз, акустооптические материалы, акустооптические приборы, дифракционный модулятор, составной резонатор.

**Ссылка:** Фещенко В. С., Зяблук К. Н., Шепелев В. А., Сенокосов Э. А. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 5.  
**Reference:** V. S. Feshchenko, K. N. Zyblyuk, V. A. Shepelev, and E. A. Senokosov, Prikl. Fiz., No. 5, 5 (2018).

### Введение

Тенденция к повышению рабочих частот акустооптических приборов, достигающих порой десятков ГГц, приводит к тому, что классические конструктивные решения для этих приборов малопригодны. Так, например, для изготовления встречно-штыревой структуры, генерирующей на поверхности пьезоэлектрика волну с частотой 1,5 ГГц, необходимо использовать микролитографию с проектными нормами ~50 нм [1]. Это довольно сложно технологически и предъявляет су-

ровые требования к поверхности материала. Кроме того, возникают известные трудности с подбором материалов, соответствующих новым требованиям к акустоэлектрическим приборам [1, 2].

Кварцевый резонатор, отлично служивший для целей акустоэлектроники на относительно низких частотах, не подходит для сверхвысоких частот (СВЧ) по целому ряду причин [1]. Для приборов, функционирующих на частотах ~ единиц и десятков ГГц, необходимо использовать высокодобротные подложки из кристаллов, обладающих сочетанием таких свойств, как низкое акустическое затухание, высокие скорости звука, высокий коэффициент электромеханической связи, хорошая термостабильность и т. д. [1]. Но, к сожалению, материалов, сочетающих одновременно все эти качества, не существует. Для решения задачи перехода к СВЧ-диапазону было предложено использовать пьезоэлектрическую структуру типа сэндвича, в которой толщины пьезоэлектрического преобразователя и электродов, где возбуждается акустическая волна, на порядки меньше толщины кристаллической подложки, в которой происходит взаимодействие света с акустической волной [3–7]. В этом случае говорят о составном акустическом резонаторе (CAP). В англоязычной литературе для обозначения этого устройства принят термин High Overtone Bulk Acoustic Resonator (HBAR) [6, 7].

**Фещенко Валерий Сергеевич**<sup>1</sup>, нач. лаборатории, д.т.н., доцент.  
**Зяблук Константин Николаевич**<sup>1</sup>, нач. лаборатории, к.ф.-м.н.

**Шепелев Валерий Андреевич**<sup>1</sup>, н.с.

**Сенокосов Эдуард Александрович**<sup>2</sup>, зав. НИЛ.

«Полупроводниковые преобразователи», д.ф.-м.н., профессор.

<sup>1</sup> ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест».

Россия, 121108, Москва, ул. Ивана Франко, 4.

Тел. 8(499) 146-19-18. E-mail: info@uralalmazinvest.ru

<sup>2</sup> Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко.

Молдова, MD 3000, г. Тирасполь, ул. 25 Октября, 128.

Тел. (8-10-533) 7-95-22. E-mail: senokosov37@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

© Фещенко В. С., Зяблук К. Н., Шепелев В. А., Сенокосов Э. А., 2018

Многие исследователи предлагают использовать в качестве кристаллической подложки монокристаллический алмаз [4, 5, 8] в связи с его уникальными качествами, например, такими как высокая скорость звука (вдоль кристаллографического направления [111] она наивысшая из возможных земных материалов и достигает 18600 м/с), а также низкое акустическое затухание. Всё это позволяет возбудить резонатор на наивысших частотах среди всех известных материалов, поскольку резонансная частота при одинаковой геометрии устройства пропорциональна скорости объёмной акустической волны (ОАВ).

В работах посвящённых акустоэлектрическим приборам и структурам на алмазе детально разобраны и рассчитаны как электрические, так и акустические частотные характеристики САР и их зависимость от геометрических и электрических параметров системы [4, 5]. Но за кадром остался такой важный вопрос для любого акустооптического преобразователя как эффективность акустооптического взаимодействия в алмазной подложке, без чего невозможно приступить к разработке реальных приборов.

Целью данной работы является построение модели акустооптического взаимодействия в алмазе на разных акустических частотах и на её основе проведение расчёта параметров дифракции оптического излучения на акустических волнах.

### Постановка задачи и краткая теория

В качестве прототипа структуры для расчёта параметров акустооптического взаимодействия мы взяли систему (ячейку), изображённую на рис. 1 и ранее описанную в работе [5].

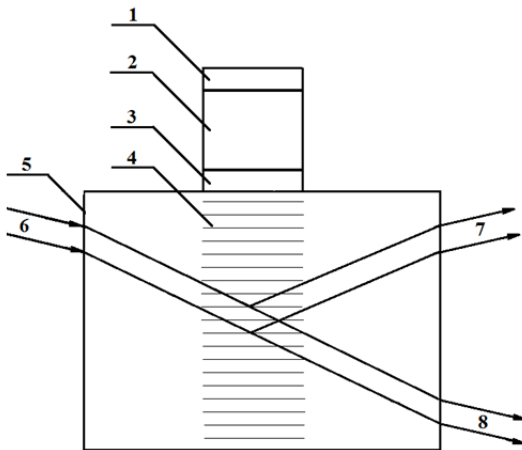


Рис. 1. Акустооптическая ячейка по [5]. 1 – алюминий; 2 – нитрид алюминия; 3 – молибден; 4 – столб ультразвука, который генерируется в слое нитрида алюминия; 5 – алмазный волновод; 6 – падающий оптический пучок  $I_0$ ; 7 – дифрагировавший оптический пучок (1-й порядок дифракции –  $I_1$ ); 8 – прошедший оптический пучок (нулевой порядок дифракции –  $I_0$ ).

Данный прототип описывает реальный образец, причем в [5] рассчитаны и измерены его реальные электрические параметры и частотные зависимости, которые можно взять как граничные условия для расчёта акустооптического взаимодействия в алмазной подложке. Так как у этой системы полоса пропускания (или, как определено в [5], «рабочая область»), исходя из электроакустических параметров, простирается от 3 до 8 ГГц, то определим для себя в качестве центральной частоты акустической волны конкретную частоту, а именно,  $f_0 = 6$  ГГц. Источником оптического излучения будет служить полупроводниковый лазер с длиной волны  $\lambda = 650$  нм.

Для начала определимся, с каким типом дифракции мы будем иметь дело при вышеизложенных условиях. Обратимся к работе [9], в которой был предложен критерий, разграничивающий дифракцию Рамана-Ната и дифракцию Брэгга, в виде параметра  $Q$ :

$$Q = 2\pi d\lambda / \Lambda^2, \quad (1)$$

где  $d$  – длина звукового столба;  $\lambda$  – длина волны оптического излучения;  $\Lambda = V/f$  – длина акустической волны;  $V$  – фазовая скорость звука;  $f$  – частота звука в материале. При  $Q \ll 1$  имеет место дифракция Рамана-Ната, при  $Q \gg 1$  – дифракция Брэгга. Однако в работе [10] были введены более строгие критерии для определения вида дифракции. В частности, было показано, что дифракция Рамана-Ната наблюдается уже при значениях

$$Q \leq 0,3, \quad (2)$$

а дифракция Брэгга при значениях

$$Q \geq 4\pi. \quad (3)$$

Подставляя в формулу (1) известное значение [11] минимальной скорости звука в алмазе  $V_{[100]} = 17600$  м/с и принимая длину звукового столба 1 мм, получим величину  $Q \approx 151\pi \gg 4\pi$ . Следовательно, при этой конфигурации ячейки и граничных условиях мы будем иметь дело с дифракцией Брэгга и соответственно должны использовать математический аппарат для этого случая.

При дифракции Брэгга дифракционные максимумы минус первого и высших порядков отсутствуют. Интенсивность первого максимума будет наибольшей, если оптическое излучение падает под углом к волновому фронту акустической волны, удовлетворяющему условию Брэгга:

$$\sin \Theta_B = \lambda / 2\Lambda. \quad (4)$$

Угол  $\Theta_B$ , определяемый выражением (4), называется углом Брэгга. Дифракция Брэгга имеет

место на высоких частотах при большой длине взаимодействия оптического излучения с акустической волной.

Для акустоэлектрического преобразователя основными оптическими параметрами являются дифракционная эффективность и угол отклонения оптического пучка [1]. Угол отклонения оптического пучка можно получить из выражения (4), а дифракционную интенсивность  $\eta$  определим следующим образом:

$$\eta = \frac{I_i}{I_0} \times 100\%, \quad (5)$$

где  $I_0$  – интенсивность оптического излучения в нулевом порядке дифракции;  $I_i$  – интенсивность оптического излучения в  $i$ -м порядке дифракции.

Отношение интенсивности дифрагирующего оптического излучения к интенсивности оптического излучения в нулевом порядке дифракции можно получить из следующего соотношения [13]:

$$\frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda \cos \Theta_B} \sqrt{\frac{P_a l}{2H}} M_2 \right), \quad (6)$$

где  $M_2$  – акустооптическое качество материала [12, 13];  $P_a$  – акустическая мощность;  $l$  – эффективная длина акустооптического взаимодействия;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $H$  – поперечный размер звукового пучка в плоскости, ортогональной плоскости акустооптического взаимодействия.

Величина  $M_2$  является основным критерием при выборе фотоупругой среды [12] и характеризует эффективность взаимодействия независимо от геометрии оптического и акустического пучков. Чем выше качество  $M_2$ , тем меньшая акустическая мощность требуется для получения необходимой дифракции [12, 13].

Согласно работам [12–14], акустооптическое качество материала выражается в следующем виде:

$$M_2 = \frac{p_{eff}^2 n^6}{\rho V^3}, \quad (7)$$

где  $p_{eff}$  – эффективная акустооптическая постоянная;  $n$  – коэффициент преломления материала;  $\rho$  – плотность материала;  $V$  – фазовая скорость звука в материале.

Эффективная акустооптическая постоянная зависит от группы симметрии кристалла, и её расчёт в общем виде является достаточно трудоёмкой задачей [12], которая усугубляется тем фактом, что при численном расчёте из-за несимметричности матрицы положения экстремумов функций  $p_{eff}^i(\alpha)$  зависят от значений соответствующих констант  $p_{ij}$  [15].

В нашем случае положение облегчает тот факт, что выбранный нами материал является кубическим кристаллом. Благодаря этому факту существуют всего два [17] кристаллографических направления [100] и [111], в которых могут распространяться чисто продольные моды, а поперечные моды будут вырождены. Следовательно, при конструировании акустоэлектрических приборов, с точки зрения оптимизации энергетики и минимизации помех, нужно использовать только эти два среза по плоскостям {100} и {111}. Более того, в работах [16, 17] было показано, что для всех простых материалов с решёткой типа алмаза,  $p_{eff}$  соответствует направлению [111] для электромагнитной волны, поляризованной вдоль той же оси и падающей ортогонально звуковому столбу, а в [16] было получено следующее соотношение для его вычисления

$$p_{eff} = \frac{(p_{11} + 2p_{12} + 4p_{44})}{3}, \quad (8)$$

где  $p_{ik}$  – соответствующие акустооптические постоянные алмаза.

Ещё одной важной характеристикой акустооптического преобразователя является полоса пропускания. Будем считать, что допустимое отличие угла падения от угла Брэгга соответствует падению интенсивности не более чем на 3 дБ. Тогда предельная полоса пропускания будет записана в виде соотношения из работы [18]:

$$\Delta f = 1,78 \frac{nV^2}{\lambda f_0}. \quad (9)$$

Теперь перейдём непосредственно к расчёту акустооптических параметров ячейки на алмазе.

### Расчет акустооптических параметров и обсуждение результатов

Согласно выражению (4), а также учитывая, что скорость звука в алмазе вдоль направления [111] составляет  $V_{[111]} = 18600$  м/с, угол Брэгга на центральной частоте можно будет выразить следующим образом:

$$\Theta_B = \arcsin \left( \frac{650 \times 10^{-9} \times 6 \times 10^9}{2 \times 18600} \right) \approx 6,03^\circ.$$

В связи с тем, что в справочниках отсутствует параметр  $M_2$  для алмаза, он высчитывался по формуле (7). При более внимательном изучении вопроса выяснилась причина отсутствия этого параметра в справочниках. Дело в том, что в различных источниках представлены различные зна-

чения для акустоэлектрических параметров алмаза  $p_{ik}$ . Это связано, скорее всего, с тем фактом, что для исследований, проводимых в 50-х – 90-х годах прошлого века, использовались природные алмазы с большим разбросом физических параметров. Синтетические алмазы оптического и электронного качества, причём достаточно больших размеров, появились сравнительно недавно, не более десяти лет назад. Видимо, именно поэтому пока нет исследований по определению акустооптических параметров совершенного монокристаллического алмаза.

Можно выразить надежду, что широкое использование алмазных материалов для СВЧ-приложений будет стимулировать эти исследования.

Далее в таблице представлены коэффициенты  $p_{ik}$  для алмазов, полученные из различных источников, их усредненные значения, а также рассчитанные  $p_{eff}$  и  $M_2$  (таблица, строка 6). Значения отдельных коэффициентов  $p_{ik}$  имеют погрешность от 16 % до 90 %. Итоговая  $M_2$  для алмаза имеет погрешность 100 %.

Таблица

Акустооптические параметры алмазов

№	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{44}$	$p_{eff}$	$M_2, (c^{-3}/кг)$	Источник
1	-0,31	-0,003	-0,172	-0,334	$1,10 \times 10^{-15}$	[11]
2	-0,278	+0,123	-0,161	-0,225	$4,98 \times 10^{-16}$	[15]
3	-0,249	+0,043	-0,172	-0,284	$7,88 \times 10^{-16}$	[19]
4	-0,249	+0,043	-0,172	-0,284	$7,88 \times 10^{-16}$	[20]
5	-0,125	+0,325	-0,11	0,028	$7,87 \times 10^{-18}$	[21]
6	-0,242	+0,106	-0,157	-0,220	$4,73 \times 10^{-16}$	Среднее

В конечном итоге, для расчёта дифракционной эффективности мы использовали наиболее достоверные, с нашей точки зрения, данные из источника [20]. Он является самым поздним изданием по времени. И в нём проведён анализ всех предыдущих работ.

Дифракционная эффективность  $\eta$  рассчитывалась по формулам (5) и (6). Результаты представлены в виде графика на рис. 2.

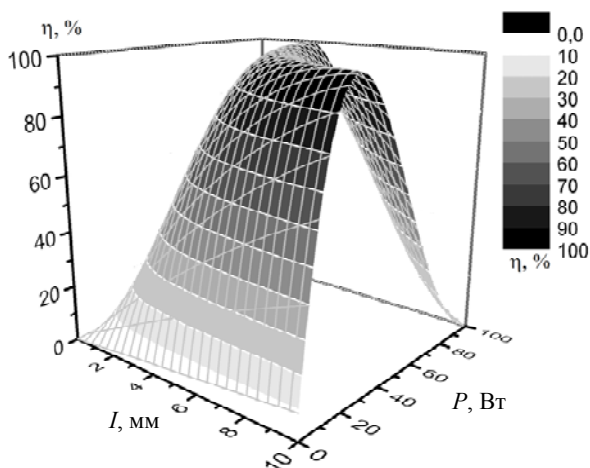


Рис. 2. График зависимости дифракционной эффективности в акустооптической ячейке на алмазе от мощности генератора  $P_a$  и длины акустооптического взаимодействия  $l$ .

Из графика видно, что дифракционная эффективность имеет ярко выраженный максимум, связанный с синусоидальным характером зависимости дифракционной эффективности от акустической мощности  $P_a$  и длины акустооптического взаимодействия  $l$ . Также на графике видно, что с

ростом длины взаимодействия растёт селективность акустооптической ячейки и уменьшается  $P_a$ , необходимая для достижения максимальной дифракционной эффективности. Что, в общем, то и понятно. Действительно, с увеличением длины акустооптического взаимодействия увеличивается количество слоёв интерференционного фильтра, созданного звуковой волной в кристалле алмаза, от которых отражается оптический пучок. Соответственно, чем больше таких слоёв, тем более селективным будет фильтр и больше оптического излучения будет отражено в направлении дифракционного максимума.

На рис. 3 показана зависимость дифракционной эффективности от  $P_a$  при  $l = 2$  мм. Из этого графика следует, что на начальном участке 0–50 Вт чувствительность этой ячейки будет примерно 1,6 % на 1 Ватт.

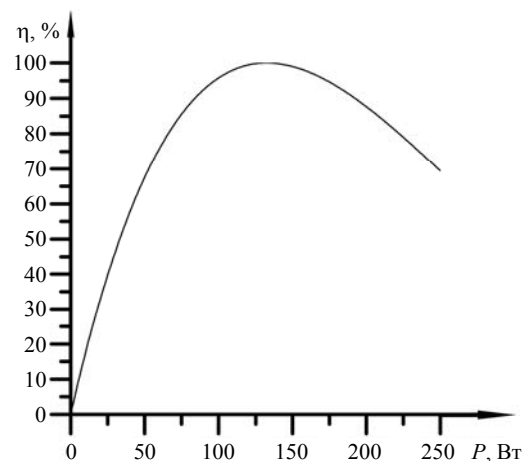


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности от акустической мощности при  $l = 2$  мм.

Но самый энергетически выгодный участок находится в диапазоне от 50 до 250 Вт, где дифракционная эффективность мало изменяется от акустической мощности.

Рассмотрим теперь такой важный параметр, как полоса пропускания акустооптической ячейки. Согласно формуле (9), при  $l = 2$  мм имеем выражение:

$$\Delta f_{650} = 1,78 \frac{2,43 \times 18600^2}{650 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^{-3} \times 6 \times 10^9} \approx 191,85 \text{ МГц.}$$

Как видно из вышеизложенного результата, полоса пропускания, обусловленная акустооптическим взаимодействием в алмазе, в 26 раз уже, чем полоса пропускания, обусловленная электроакустическим взаимодействием [5]. И, следовательно, именно акустооптическое взаимодействие будет определять полосу пропускания системы в целом. Возникает вопрос, можно ли расширить полосу пропускания данной системы? Очевидный путь – это уменьшение длины волны оптического излучения (алмаз прозрачен до 226 нм) и уменьшение центральной частоты. Хотя второй путь нежелателен ввиду актуальности задачи повышения частоты работы исследуемой нами системы. Если изменить рабочую длину волны и взять её равной  $\lambda = 226$  нм, то с учётом того, что коэффициент преломления алмаза станет  $n = 2,72$  [20, 22], получим  $\Delta f_{226} \approx 520,64$  МГц. Таким образом, удалось увеличить полосу пропускания в 2,7 раза! Но всё равно, по сравнению с полосой пропускания, обусловленной электроакустическим взаимодействием, это в десять раз меньше. Дальнейшее расширение диапазона пропускания возможно только с изменением конструкции акустооптической ячейки [23], её геометрических параметров и не связано со свойствами самого алмаза.

### Заключение

В заключение этой работы можно сделать следующие выводы. Теоретически исследована дифракция оптического излучения на акустических волнах в алмазной подложке на примере реально существующей акустоэлектрической структуры. Исследованы зависимости оптических характеристик этой структуры от акустической мощности и длины звуковой волны (периода решётки) в алмазе. Полученные зависимости позволят приступить к проектированию реальных акустооптических устройств, таких как дефлекторы, акустические линии задержки, фильтры, акустооптические устройства обработки оптической информации.

Из вышеизложенного видно, что уникальные свойства алмаза, такие как широкая полоса оптической прозрачности, низкие акустические и

оптические потери и высокая скорость звука, позволяют конструировать в одних и тех же габаритных размерах различные акустоэлектрические приборы. Например, можно легко менять акустическую полосу модуляции посредством изменения длины волны оптического излучения, получая при этом либо дефлектор (узкая полоса модуляции), либо акустооптические устройства обработки оптической информации и линии задержки (широкая полоса модуляции).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Morgan D.* Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1990. [Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo: ELSEVIER; 1985].
2. *Schulz M. B., Matsinger J. H.* // Appl. Phys. Lett. 1972. No. 20. P. 367.
3. *Басанец В. В., Болтовец Н. С., Гуцул А. В. и др.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 3. С. 113.
4. *Sorokin V. P., Kvashnin G. M., Volkov A. P., Bormashov V. S., Aksenkov V. V., Kuznetsov M. S., Gordeev G. I., Telichko A. V.* // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. No. 11. P. 113507.
5. *Сорокин В. П., Квашигин Г. М., Теличко А. В., Гордеев Г. И., Бурков С. И., Бланк В. Д.* // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 4. С. 464.
6. *Gosavi T. A., MacQuarrie E. R., Fuchs G. D., Bhave S. A.* / IEEE International Ultrasonics Symposium (Ultrasonics 2015), Taipei, Taiwan, October 21–24, 2015. P. 1–4.
7. *Liu M., Zhu M., Li J., Zhej J. Wang Ch.* // SCIENCE C. 2013. Vol. 14. No. 4. P. 279.
8. *Tabrizian R., Rais-Zadeh M., Ayazi F.* In Book: Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers) P. 2131. – Denver, CO. 2009.
9. *Klein W. R., Cook B. D.* IEEE Trans. 1967. Vol. SU-14. JvB 3. P. 123.
10. *Uchida N., Niizeki N.* Proc. IEEE. 1973. Vol. 61. No. 8. P. 1073.
11. Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е.З. Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
12. *Балакшиев В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985.
13. *Магдич Л. Н., Молчанов В. Я.* Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов. Радио, 1978.
14. *Smith T. M., Korpel A.* // IEEE J. Quant. El. 1965. Vol. QE-1. No. 9. P. 283.
15. *Никитин П. А.* Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.04.03. – М.: МГУ, 2017.
16. *Fox A. J.* // Applied Optics. 1985. Vol. 24. Is. 14. P. 2040.
17. *Кулеев И. Г., Кулеев И. И.* // ФТТ. 2007. Т. 49. Вып. 3. С. 422.
18. Справочник по лазерам / Под ред. акад. А. М. Прохорова. В 2-х томах. Т. II. – М.: Сов. Радио. – 1978. [Pressley RJ (ed.). Handbook of lasers with selected data on optical technology: in 2 volumes. Cleveland: «Chemical Rubber Co», 1971].
19. *Фабелинский И. Л., Чистый И. Л.* // УФН. 1976. Т. 119. Вып. 3. С. 487.
20. *Zaitsev A. M.* Optical Properties of Diamond. – Berlin: University of Bochum, Springer, 2001.
21. *Nye J. F.* Physical properties of crystals. – Oxford: Clarendon Press. 1964.
22. Природные алмазы России: Научно-справочное издание. Ред. В. Б. Квасков. – М.: Полярон, 1997.
23. *Петров В. В.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 11. С. 53.

## Diffraction of optical radiation on acoustic waves in the diamond

V. S. Feshchenko<sup>1</sup>, K. N. Zyablyuk<sup>1</sup>, V. A. Shepelev<sup>1</sup>, and E. A. Senokosov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Production-Technological Center «UralAlmazInvest», Ltd.  
4 Ivana Franko str., Moscow, 121108, Russia  
E-mail: feshchenko@mail.ru

<sup>2</sup> T. G. Shevchenko Dniester State University  
128, 25 Oktyabrya str., Tiraspol, MD 3300, Moldova  
E-mail: senokosov37@mail.ru

Received June 19, 2018

***In this paper, the interaction of laser radiation with a wavelength of 650 nm with a bulk acoustic wave in a composite acoustic resonator on a diamond at a frequency of 6 GHz was theoretically investigated. The mathematical model of this interaction is constructed and the Bragg diffraction of the optical wave in the diamond is studied on its basis. It was shown that the Bragg angle in the diamond at diffraction on an acoustic wave with a frequency of 6 GHz is 6 degrees. The maximum diffraction efficiency, when the length of interaction of optical radiation with sound is 2 mm, and the width of the beam is 1 mm, is achieved when the acoustic power of 125 watts. The modulation band of the acoustic wave, in these conditions, is 191.85 MHz. By reducing the optical wavelength to 226 nm, it was possible to expand the acoustic wave modulation band to 520.64 MHz. Based on the obtained data, it was concluded that the bandwidth in the composite acoustic resonator on the diamond is formed by acousto-optic interaction, not acousto-electric one.***

**Keywords:** acousto-optical materials, acousto-optical devices, diamond, diffraction modulators, HBAR.

### REFERENCES

1. D. P. Morgan, *Surface-Wave Devices for Signal Processing*. (Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo: ELSEVIER; 1985).
2. M. B. Schulz and J. H. Matsinger, *Appl. Phys. Lett.*, No. 20, 367 (1972).
3. V. V. Basanets, N. S. Boltovets, A. V. Gutsul, A. V. Zorenko, V. G. Ral'chenko, A. E. Belyaev, V. P. Klad'ko, R. V. Konakova, Ya. Ya. Kudrik, A. V. Kuchuk, and V. V. Milenin, *Technical Physics* **58** (3), 420 (2013).
4. B. P. Sorokin, G. M. Kvashnin, A. P. Volkov, V. S. Bormashov, V. V. Aksenonkov, M. S. Kuznetsov, G. I. Gordeev, and A. V. Telichko, *Appl. Phys. Lett.* **102** (11), 113507 (2013).
5. B. P. Sorokin, G. M. Kvashnin, A. V. Telichko, G. I. Gordeev, S. I. Burkov, and V. D. Blank, *Acoust. Phys.* **60** (4), 422 (2015).
6. T. A. Gosavi, E. R. MacQuarrie, G. D. Fuchs, and S. A. Bhave, in *Proc. 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings* (Taipei, 2015).
7. M. Liu, M. Zhu, J. Li, and Ch. Wang, *SCIENCE C* **14** (4), 279 (2013).
8. R. Tabrizian, M. Rais-Zadeh, and F. Ayazi, in *Proc. TRANSDUCERS 2009 – 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (Denver, 2009) P. 2131–2134.
9. W. R. Klein and B. D. Cook, *IEEE Trans.*; SU-14(JVb 3), 123 (1967).
10. N. Uchida and N. Niizeki, *Proc. IEEE* **61** (8), 1073, (1973).
11. I. S. Grigorjev, E. Z. Mejlihov (eds.). *Physical values: reference book* (Moscow, Energoatomizdat; 1991) [in Russian].
12. V. I. Balakshiy, V. N. Parygin, and L. E. Chirkov, *Physical foundations of acousto-optics*. (Moscow, Radio and Svyaz, 1985) [in Russian].
13. L. N. Magdich and V. Ya. Molchanov, *Acousto-optic devices and their applications* (Moscow: Sovetskoe radio; 1978) [in Russian].
14. T. M. Smith and A. Korpel, *IEEE J. Quant. El.* **QE-1** (9), 283 (1965).
15. P. A. Nikitin, Thesis for physical and mathematical sciences doctor, Moscow: MGU.
16. A. J. Fox, *Applied Optics* **24** (14), 2040 (1985).
17. I. G. Kuleev and I. I. Kuleev, *Phys. Solid State* **49** (3), 437 (2007).
18. R. J. Pressley (ed.). *Handbook of lasers with selected data on optical technology: in 2 volumes*. [Cleveland: Chemical Rubber Co; 1971].
19. I. L. Fabelinskii and I. L. Chisty, *Sov. Phys. Usp.* **19** (7), 597 (1976).
20. A. M. Zaitsev, *Optical Properties of Diamond. A data handbook*. (Berlin: University of Bochum, Springer; 2001).
21. J. F. Nye, *Physical properties of crystals*. [Oxford: Clarendon Press; 1964].
22. V. B. Kvaskov (ed.), *Natural diamonds of Russia: reference publication*. (Moscow, Polyaron, 1997) [in Russian].
23. V. V. Petrov, *Tech. Phys.* **42** (11), 1289 (1997).