

06;07

Фоторефрактивный эффект в монокристалле ZnGeP_2

© П.М. Караваев, В.М. Абусев, Г.А. Медведкин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
E-mail: pmk.shuv@mail.ioffe.ruПоступило в Редакцию 17 октября 2005 г.
В окончательной редакции 1 февраля 2006 г.

Впервые проведены исследования фоторефрактивного эффекта в алмазоподобном монокристалле ZnGeP_2 и показана возможность голографической записи в ZnGeP_2 с использованием этого эффекта. Исследовано двухволновое взаимодействие в объеме кристалла ZnGeP_2 . Определены диффузионная длина носителей заряда, максвелловское время релаксации и величина $\mu\tau$ — произведение подвижности на время жизни носителей заряда.

PACS: 42.65.-k, 78.20.-e

Кристаллы тройного соединения ZnGeP_2 известны своим высоким нелинейно-оптическим коэффициентом и применяются в лазерных системах для эффективной генерации второй гармоники, параметрического преобразования или генерации суммарных и разностных частот лазерного излучения в среднем ИК-диапазоне спектра [1,2]. В недавних работах по материаловедению в системе Mn-ZnGeP_2 было обнаружено новое свойство, редкое для алмазоподобных соединений — высокотемпературный ферромагнетизм [3–5], что открывает дополнительные перспективы при разработке устройств магнитооптики и спинтроники, действующих в условиях комнатной температуры. Кристаллы имеют структуру халькопирита (пространственная группа симметрии $42m$), обладают оптическим дихроизмом и положительным двулучепреломлением как в области прозрачности, так и в области фундаментального края поглощения ($E_g = 1.99$ eV при $T = 300$ K), а также электрооптическим эффектом.

Поскольку минимальный межзонный оптический переход — псевдопрямой и поглощение достигает 10^3 cm^{-1} , то только в высококачественных образцах вблизи E_g (например, на длине волны излучения

базового HeNe лазера, $E_{ex} = 1.96 \text{ eV}$) можно реализовать условия уверенного наблюдения в геометрии „на прохождении“ предполагаемого фоторефрактивного эффекта.

Ранее было известно о хороших фоточувствительных свойствах кристаллов и барьерных структур на основе $ZnGeP_2$ [6], не сложно также предположить о наличии значительного электрооптического эффекта в $ZnGeP_2$, учитывая высокие значения нелинейно-оптических коэффициентов для данных кристаллов [8], однако сведения о наблюдении фоторефрактивного эффекта или электрооптических характеристик в кристаллах халькопиритов из группы соединений II–IV–V₂ (в частности, $ZnGeP_2$) в литературе на настоящий момент отсутствуют.

Поэтому целью настоящей работы было обнаружение и исследование объемного фоторефрактивного эффекта в кристалле тройного соединения $ZnGeP_2$ методом записи голографической решетки с помощью когерентных лучей на красной длине волны HeNe лазера. Такие исследования позволяют нам определить ряд фундаментальных параметров кристалла: диффузионную длину фотовозбужденных носителей заряда, максвелловское время релаксации, величину произведения подвижности фотовозбужденных носителей на время их жизни.

Фоторефрактивный эффект заключается в изменении показателя преломления вещества под действием падающего на него света [7]. Освещая фоторефрактивный кристалл двумя когерентными пучками света, мы можем записать в кристалле фазовую голограмму. В экспериментах обычно используют запись элементарной синусоидальной фазовой дифракционной решетки — голограммы, образованной интерференцией двух плоских световых волн.

Механизм формирования решетки следующий: два пучка света образуют интерференционную картину — набор светлых и темных полос. В кристалле в освещенных областях происходит генерация носителей заряда, носители заряда диффундируют либо дрейфуют во внешнем электрическом поле в темные области, где захватываются ловушками, образуя на них объемный заряд, повторяющий по пространственному распределению интерференционную картину. Пространственный заряд создает электрическое поле, которое через электрооптический эффект приводит к изменению показателя преломления вещества. Пространственное распределение изменения показателя преломления также повторяет пространственное распределение интерференционной картины [7].

Пучки света, записывающие фазовую дифракционную решетку, сами будут на ней дифрагировать. Это явление называется двухволновым взаимодействием или самодифракцией [7]. В случае диффузионного механизма записи (в отсутствие внешнего электрического поля) происходит перекачка интенсивности из одного пучка в другой, а в случае дрейфового механизма записи (к кристаллу прикладывается внешнее электрическое поле) — перекачка фазы [7]. В нашем эксперименте использовался диффузионный механизм записи. Для экспериментальной регистрации двухволнового взаимодействия один из пучков (объектный S) модулируется по фазе. Фотодетектор находился в исходно-немодулированном пучке (опорном R), прошедшем через кристалл. За счет перекачки амплитуды из одного пучка в другой в исходно-немодулированном пучке, за счет интерференции прошедшего кристалл пучка R и перекачанной фазово-модулированной части пучка S наблюдается амплитудная модуляция, регистрируемая фотодетектором.

Зависимость амплитуды сигнала двухволнового взаимодействия от пространственной частоты дифракционной решетки выражается следующей формулой [7]:

$$U^{2\text{WM}} \propto \frac{K}{1 + K^2 L_D^2}, \quad (1)$$

где $K = 2\pi\Lambda^{-1}$ — волновой вектор голографической решетки, $\Lambda^{-1} = 2 \sin \theta / \lambda$ — пространственная частота интерференционной картины, θ — половина угла между записывающими лучами, λ — длина волны записывающего света;

$$L_D = \sqrt{D\tau} = \sqrt{\frac{kT}{e} \mu \tau}, \quad (2)$$

L_D — диффузионная длина носителей заряда, D — коэффициент диффузии, τ — время жизни носителей заряда, μ — подвижность носителей заряда, k — постоянная Больцмана, T — температура, e — заряд электрона.

Таким образом, измеряя зависимость амплитуды сигнала двухволнового взаимодействия от пространственной частоты решетки, мы можем определить диффузионную длину носителей заряда и произведение $\mu\tau$ для носителей заряда [7].

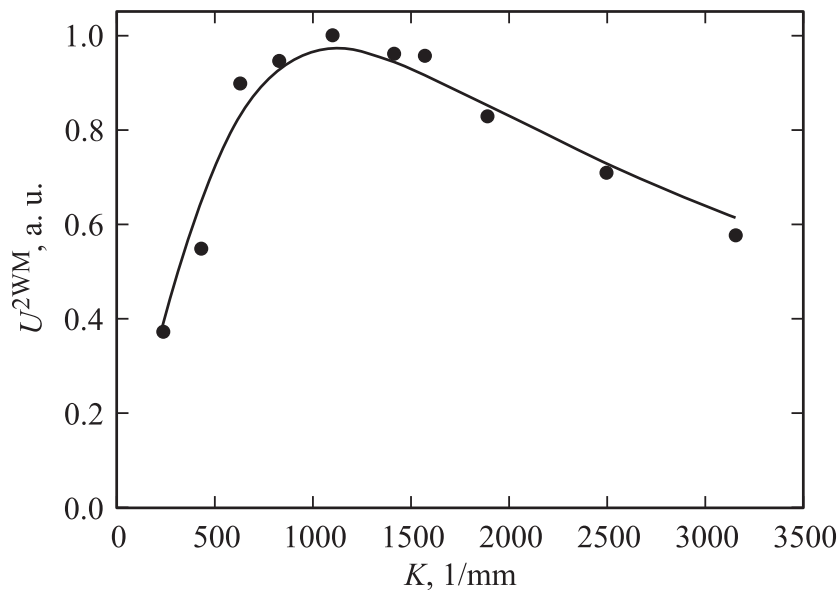


Рис. 1. Экспериментальная зависимость амплитуды сигнала двухволнового взаимодействия от пространственной частоты записываемой решетки (точки) и теоретическая аппроксимация экспериментальных результатов по формуле (1) (линия).

Согласно работе [7], частотная зависимость амплитуды сигнала двухволнового взаимодействия от частоты фазовой модуляции сначала линейно возрастает с ростом частоты, а затем выходит на стационарный уровень. По частоте, соответствующей выходу на стационарный уровень, можно определить максвелловское время релаксации носителей заряда, пользуясь выражением [7]:

$$\tau_m = \frac{1}{\omega_0(1 + K^2 L_D^2)}, \quad (3)$$

где ω — частота, соответствующая выходу на стационарный уровень.

В настоящей работе был использован нелегированный монокристалл $ZnGeP_2$ с низким остаточным оптическим поглощением в полосе прозрачности ($\alpha < 0.03 \text{ cm}^{-1}$), что позволяло уверенно регистрировать вы-

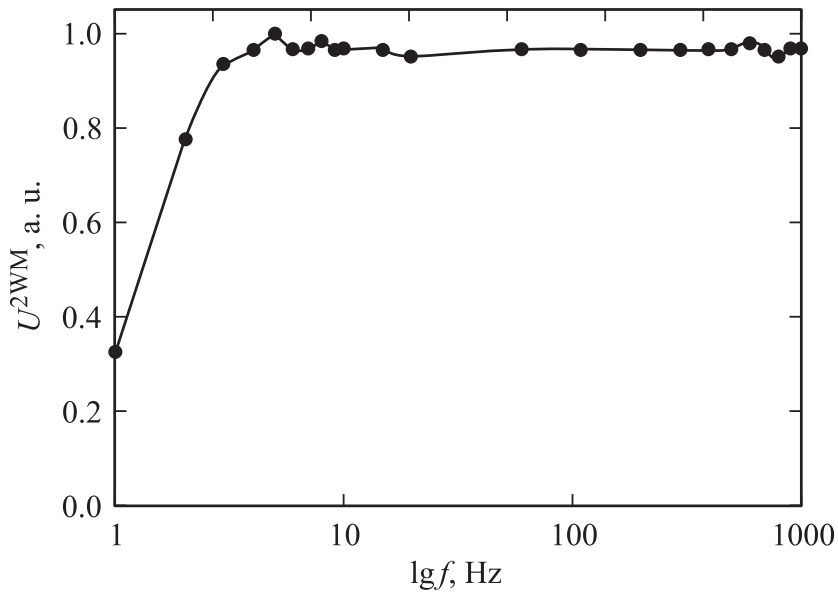


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала двухволнового взаимодействия от частоты модуляции объектного пучка записывающего света. $K = 1000$ 1/mm.

ходной оптический сигнал Si-фотодиодом (ФД-24К). Для исследования ФР эффекта был выбран образец № 02-1 размерами $6 \times 1.7 \times 1.2$ mm с базовым изотропным срезом (001) для полированных с оптическим качеством сторон 6×1.7 mm, параллельных с точностью не хуже 1 угл. мин. Ось C кристалла была направлена по нормали к передней грани.

В эксперименте использовался гелий-неоновый лазер ($\lambda = 632.8$ nm, интенсивность 20 mW). В образце формировалась интерференционная картина с помощью двух лазерных лучей — опорного R и объектного S . В результате в кристалле записывалась фазовая динамическая голограмма. Объектный луч модулировался по амплитуде при помощи электрооптического модулятора с глубиной модуляции 10% на частоте 1 kHz. Пространственная частота решетки варьировалась путем изменения угла между записывающими лучами. Сигнал двухволново-

го взаимодействия регистрировали при помощи фотодиода ФД-24К, подключенного к селективному усилителю UNIPAN. Образец был установлен таким образом, чтобы угол между осью C кристалла и вектором решетки K составлял 45 градусов. В этом случае наблюдался максимальный сигнал двухволнового взаимодействия благодаря максимальному электрооптическому эффекту вдоль оси C данного кристалла.

Зависимость амплитуды двухволнового взаимодействия от пространственной частоты записываемой решетки представлена на рис. 1. Путем аппроксимации экспериментальных точек по формуле (1), используя в качестве подгоночного параметра диффузионную длину L_D , мы оценили величину диффузионной длины фотоносителей как $L_D = 1 \mu m$. Соответственно значение $\mu\tau = 3.9 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/V$.

По частотной зависимости амплитуды двухволнового взаимодействия (рис. 2) и формуле (3) определено максвелловское время релаксации $\tau_m = 230 \text{ ns}$. Большая величина максвелловского времени релаксации, по-видимому, определяется малой фотопроводимостью образца.

Таким образом, согласно проведенным экспериментальным исследованиям, можно уверенно судить о существовании фоторефрактивного эффекта в кристаллах $ZnGeP_2$.

Авторы выражают благодарность фонду Бортника за финансовую поддержку для проведения данных исследований, проект № 3001р. Образцы для исследования были изготовлены в компании „Ферробит СП“ (www.ferrobit.com).

Список литературы

- [1] *Vodopyanov K.L., Ganikhanov F., Maffetone J.P., Zwieback I., Ruderman W.* // Optics Lett. 2000. V. 25. P. 841–843.
- [2] *Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N.* // Handbook of nonlinear optical crystals. Springer, Berlin, 1997. P. 68–240.
- [3] *Medvedkin G.A., Hirose K., Ishibashi T., Nishi T., Voevodin V.G., Sato K.* // J. Cryst. Growth. 2002. V. 236. P. 609–612.
- [4] *Sato K., Medvedkin G.A., Ishibashi T.* // J. Cryst. Growth. 2002. V. 237–239. Pt 2. P. 1363–1369.
- [5] *Medvedkin G.A., Baranov P.G., Goloshchapov S.I.* // J. Phys. Chem. Solids. 2003. V. 64. P. 1691–1695.

- [6] *Медведкин Г.А., Рудь Ю.В., Таиров М.А.* Полупроводниковые кристаллы фотоприемников линейно-поляризованного излучения. Ташкент: Изд-во „Фан“ АН Республики Узбекистан, 1992. 296 с.
- [7] *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука. СПб. отд-ние, 1992. 320 с.
- [8] *Ярин А., Юх П.* Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.