

## ОТКЛИК НА СЛАБОЕ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ КВАЗИОДНОМЕРНОГО ПРОВОДНИКА $NbSe_3$ В ПРИСУТСТВИИ СВЧ НАКАЧКИ

*И.Б.Вендик, А.Н.Ермоленко, В.М.Пчелкин*

Экспериментально исследовались кристаллы  $NbSe_3$  при  $T < 59$  К под воздействием слабого СВЧ сигнала с частотой  $\omega_c$  при условии, что кристалл помещен в постоянное электрическое поле и СВЧ поле накачки с напряженностями  $E_0$  и  $E_{нак}$ , обеспечивающими режим депиннинга волны зарядовой плотности. Получен отклик на СВЧ излучение мощностью менее 0,1 мкВт при мощности СВЧ накачки порядка 10 мкВт.

Известно, что кристаллы квазиодномерного проводника  $NbSe_3$  в диэлектрическом состоянии проявляют нелинейные электрические свойства, что объясняется вкладом волны зарядовой плотности (ВЗП) в процессы переноса. Движение ВЗП возникает в постоянном электрическом поле, напряженность которого  $E_0$  превышает пороговое значение  $E_{пор}$ . При  $E_0 = E_{пор}$  происходит срыв (депиннинг) ВЗП. Одновременное воздействие постоянного и высокочастотного полей приводит к изменению порогового поля, причем величина  $E_{пор}$  зависит от амплитуды поля накачки<sup>1-3</sup>. В<sup>3</sup> показано, что в образцах  $NbSe_3$  ниже температуры второго перехода ( $T_{p2} = 59$  К) наблюдается изменение порогового поля под действием СВЧ поля накачки, а также наблюдается синхронизация собственных колебаний ВЗП полем накачки вплоть до частоты 3 ГГц<sup>4</sup>. Нами была предпринята попытка обнаружить отклик ВЗП на слабое СВЧ воздействие при  $E_0 > E_{пор}$  методом прямого детектирования и регистрации выпрямленного тока, однако она не дала положительных результатов. Тем не менее, поскольку экспериментально показано<sup>3,4</sup>, что воздействие СВЧ поля накачки приводит к заметному возмущению ВЗП, можно предположить, что отклик на слабое СВЧ излучение может быть получен, если одновременно с ним на ВЗП воздействует сильное поле накачки. Данная работа посвящена описанию такого эксперимента.

Кристалл  $NbSe_3$  помещается в постоянное поле и поле СВЧ с частотой  $\omega_{нак}$ , причем напряженность поля смещения и амплитуда поля накачки  $E_{нак}$  выбираются так, чтобы был обеспечен режим депиннинга ( $E_0 + E_{нак} > E_{пор}$ ); на эту систему воздействует слабый СВЧ сигнал с амплитудой  $E_c \ll E_0$ ,  $E_{нак}$  и частотой  $\omega_c$ , близкой по величине к  $\omega_{нак}$ , так что  $\omega_c - \omega_{нак} = \Omega$  и  $\Omega \ll \omega_c, \omega_{нак}$ . В качестве отклика на СВЧ сигнал регистрируется переменное напряжение на образцах, изменяющееся по гармоническому закону с частотой  $\Omega$ .

Экспериментальные образцы представляли собой кристаллы с линейным поперечным размером 3-7 мкм. Кристалл устанавливался на поверхности полированной подложки из алюмооксидной керамики между золотыми контактными площадками, выполненными методом фотолитографии. На поверхность кристалла и контактных площадок напылялся слой индия, обеспечивающий механический и электрический контакт. При напылении использовался теневой трафарет, защищающий часть поверхности кристалла от осаждения на нее индия. Оставшаяся между контактами часть кристалла, свободная от индия представляет собой рабочую область длиной 30 – 200 мкм. В интервале температур 20 – 35 К сопротивление образцов по постоянному току 7 – 50 Ом. Пороговое напряжение для разных образцов в указанном температурном интервале 2 – 16 мВ.

Для обеспечения согласования по СВЧ и возможности подключения цепи смещения и выходной цепи на этой же подложке формировались согласующие цепи и фильтры в виде интегральной схемы (ИС) на микрополосковых линиях. Имеющийся опыт по разработке ИС СВЧ<sup>5</sup> позволил произвести расчет СВЧ напряжения на нем и выбрать необходимый режим работы.

СВЧ излучение от генератора накачки и генератора слабого сигнала подводилось к ИС с помощью коаксиального кабеля и коаксиально-полоскового перехода. Подложка с ИС монтировалась на подложкодержателе, в который встраивался термодатчик.

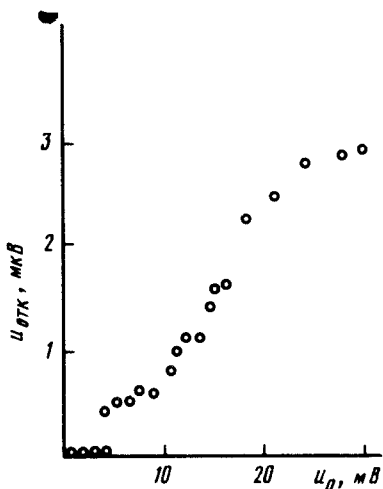


Рис. 1. Зависимость амплитуды напряжения отклика от напряжения смещения:  $P_{\text{нак}} = 100 \text{ мкВт}$ ,  $P_{\text{с}} = 0,1 \text{ мкВт}$

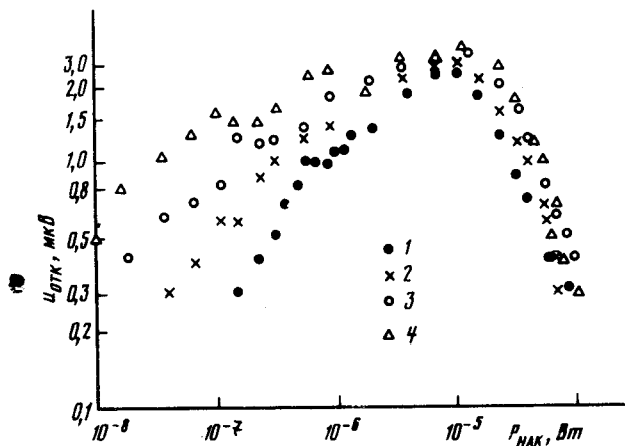


Рис. 2. Зависимость амплитуды напряжения отклика от мощности СВЧ накачки при разных напряжениях смещения  $U_0$ , мВ: 1 - 10; 2 - 12; 3 - 14; 4 - 16

Исследования проводились в гелиевом транспортном сосуде Дьюара. В качестве генераторов накачки и сигнального использовались стандартные измерительные СВЧ генераторы. Сигнальный генератор работал либо на фиксированной частоте  $\omega_{\text{с}}$ , либо в режиме качания частоты. Для индикации сигнала отклика разностной частоты использовался анализатор спектра СК4-59 с полосой обзора частот 0,5 - 100 МГц. Источник постоянного смещения выполнялся по схеме генератора тока. Сигнал отклика снимался непосредственно с образца  $\text{NbSe}_3$ . Исследования проведены на 12 образцах. Наблюдалась хорошая воспроизводимость результатов.

На рис. 1 и 2 представлены результаты эксперимента, проведенного на частоте генератора накачки 3,3 ГГц при  $T = 28 \text{ К}$ . Переменными параметрами являются напряжение смещения, мощность накачки и мощность сигнала. На рис. 1 представлена зависимость амплитуды отклика с частотой  $\Omega/2\pi = 36 \text{ МГц}$  от напряжения смещения при фиксированных уровнях мощности СВЧ сигналов для образца № 10. Пороговое напряжение в отсутствие СВЧ сигнала составляет  $U_{\text{пор}} = 7 \text{ мВ}$ , что соответствует напряженности  $E_{\text{пор}} = 0,35 \text{ В/см}$ . Сопротивление образца 40 Ом. Амплитуда напряжения СВЧ накачки соизмерима с напряжением постоянно-го смещения и при  $P_{\text{нак}} = 10 \text{ мкВт}$  составляет  $\sim 30 \text{ мВ}$ .

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды отклика от напряжения СВЧ накачки для разных значений напряжения смещения и фиксированном уровне мощности СВЧ сигнала. Зависимость отклика от напряжения сигнала линейная при выполнении условия  $P_c \ll P_{\text{нак}}$ . Во всех измерениях мощность сигнала была менее 1 мкВт. Изменение частоты генератора сигнала при переходе в режим качания частоты показало, что в полосе частот анализатора спектра при исследованных уровнях мощности накачки и сигнала не наблюдалось зависимости величины отклика от разностной частоты  $\Omega$ .

Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности ВЗП к воздействию слабого СВЧ сигнала в условиях депиннинга, вызванного совместным действием постоянного смещения и СВЧ накачки.

Авторы приносят благодарность Я.С.Савицкой и Ю.И.Латышеву за интерес к работе и предоставление кристаллов  $\text{NbSe}_3$ , а также Д.Н.Балясову за участие в эксперименте.

#### Литература

1. Zettl A., Grüner G. Phys. Rev., 1982, B25, 2081.
2. Вендик И.Б. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 784.
3. Латышев Ю.И., Минакова В.Е., Ржанов Ю.А. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 31.
4. Латышев Ю.И., Минакова В.Е. В кн.: "Неоднородные электронные состояния" тезисы докладов II Всеобщего симпозиума, Новосибирск, 1987, 21, 16.
5. Хижга Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984, с. 184.

Ленинградский электротехнический институт  
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию  
14 апреля 1988 г.