

ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВЕРХТОНКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ МЮНИЯ В КВАРЦЕ

И.И.Гуревич, А.И.Климов, В.Н.Майоров,

Е.А.Мелешко, Б.А.Никольский, В.И.Селиванов

Измерена частота ν_0 сверхтонкого расщепления примесного атома мюния в кварце: $\nu_0^{\text{SiO}_2} = 4438 \pm 8$ МГц. Полученное значение $\nu_0^{\text{SiO}_2}$ незначительно отличается от вакуумного значения $\nu_0^{\circ} = 4463$ МГц. Эксперимент выполнен во внешнем магнитном поле $H = 400$ Э с помощью аппаратуры, имеющей временное разрешение $\Delta t \approx 0,32$ нсек.

В работе [1] был предложен метод определения частоты сверхтонкого расщепления мюния (μ^+e^-) с помощью двухчастотной прецессии. Частота сверхтонкого расщепления $\nu_0^{\text{SiO}_2}$ мюния в кварце в магнитном поле $H = 100$ Э была определена в работе [2] с точностью 1,7%. Дальнейшее улучшение точности определения ν_0 возможно при наблюдении двухчастотной прецессии в магнитных полях, существенно больших 100 Э. Однако наблюдение ларморовской прецессии мюния $\omega = eH/2m_e c$ (m_e – масса электрона) в полях $H > 100$ Э затруднительно, так как при этом период $T = 2\pi/\omega$ прецессии мюния становится сравнимым с временным разрешением $\Delta t \approx 1,0$ нсек, характерным для обычно используемых сцинтилляционных детекторов $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада [3].

Цель данной работы – существенное улучшение точности определения ν_0 . Для выполнения этого эксперимента были разработаны специальные сцинтилляционные детекторы и регистрирующая аппаратура. Работа выполнена на синхроциклотроне ОИЯИ. Схема опыта приведена на рис.1. Сигналы со сцинтилляционных счетчиков 1 – 5 обрабатывались регистрирующей аппаратурой, подробно описанной в работе [3]. Для улучшения временного разрешения был использован метод "встречных ФЭУ" [4], состоящий в том, что сцинтилляторы 3 и 4 просматривались с двух противоположных сторон фотоумножителями через световоды, длина которых была 20 см для счетчика 3 и 60 см – для счетчика 4. Сигналы с двух ФЭУ, регистрирующих вспышку в сцинтилляторе 3, подавались на "схему компенсации геометрии" [5], выходной сигнал которой (момент t_μ остановки μ^+ -мезона в мишени) не зависит от места попадания частицы в сцинтиллятор. Аналогично вырабатывался сигнал t_e со счетчика 4, соответствующий моменту вылета из мишени позитрона $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада. Остальные сцинтилляторы просматривались одним ФЭУ каждый. Сигналы с этих сцинтилляторов служили для логического отбора событий. Распределение времен $t = t_e - t_\mu$ анализировалось временным кодировщиком с дифференциальной нелинейностью менее 1%. Интегральная нелинейность использованного кодировщика была лучше 10^{-4} [6, 7]. Цена канала временного кодировщика измерялась с помощью специально разработанной схемы [8] с

точностью лучше 10^{-4} . В эксперименте был использован кодировщик с ценой канала 0,10425 нсек. Суммарное число каналов — 4096. С помощью разработанной аппаратуры удалось получить временное разрешение $\Delta t \approx 0,32$ нсек и наблюдать таким образом двухчастотную прецессию мюония при $H \approx 400$ Э.

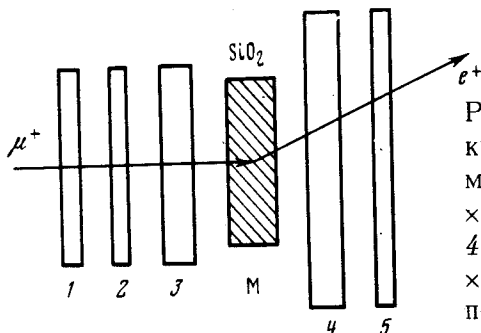


Рис. 1. Схема опыта. M — мишень из кварца. 1 — 5 — сцинтилляторы. Размеры сцинтилляторов: 1, 2 — $100 \times 100 \times 10$ мм³; 3 — $100 \times 100 \times 20$ мм³; 4 — $150 \times 150 \times 20$ мм³; 5 — $150 \times 150 \times 10$ мм³. Магнитное поле $H = 400$ Э перпендикулярно плоскости рисунка.

Рассмотрим зависимость поляризации μ^+ -мезона от времени — $P(t)$ для мюония во внешнем магнитном поле. Как известно, зависимость $P(t)$ описывается частотами ν_{ik} -переходов между состоянием мюония с различными квантовыми числами [1]:

$$\nu_{12} = \frac{\nu_0}{2} + \nu_- - \delta, \quad \nu_{14} = \frac{\nu_0}{2} + \nu_- + \delta, \quad (1)$$

$$\nu_{23} = -\frac{\nu_0}{2} + \nu_- + \delta, \quad \nu_{34} = \frac{\nu_0}{2} - \nu_- + \delta,$$

где $\delta = (\nu_0^2/4 + \nu_+^2)^{1/2}$; $\nu_{\pm} = \nu(1 \pm \xi)$; $\xi = m_e/m_{\mu} = 4,837 \cdot 10^{-3}$; m_{μ} — масса μ^+ -мезона; $\nu = \omega/2\pi$. В том случае, когда экспериментальное временное разрешение не позволяет регистрировать большие частоты ν_{14} и ν_{34} , зависимость поляризации $P(t)$ μ^+ -мезона от времени во внешнем поле $H < H_0 \approx 1590$ Э (H_0 — сверхтонкое поле на электро-мюонии в 1S-состоянии, обусловленное магнитным моментом μ^+ -мезона) записывается в виде [1]:

$$4P(t) = \left(1 + \frac{\nu_+}{\delta}\right) \cos 2\pi\nu_{12}t + \left(1 - \frac{\nu_+}{\delta}\right) \cos 2\pi\nu_{23}t. \quad (2)$$

Частота сверхтонкого расщепления ν_0 , согласно (1), выражается через наблюдаемые частоты ν_{12} и ν_{23} :

$$\nu_0 = \frac{2(\nu_{12} + \xi\nu_{23})(\nu_{23} + \xi\nu_{12})}{(\nu_{23} - \nu_{12})(1 - \xi)^2}. \quad (3)$$

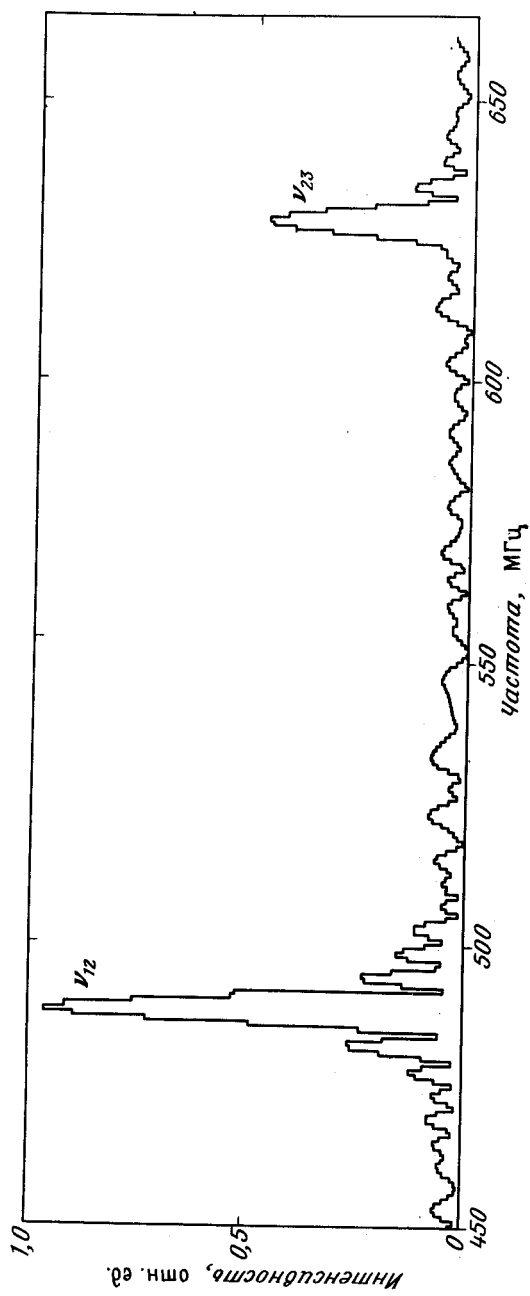


Рис.2. Фурье-преобразование экспериментального спектра $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада в кварце в поле $H = 400 \text{ Э}$

Двухчастотная прецессия мюония наблюдалась в настоящей работе в плавленном кварце в поле $H = 4003$. Экспериментальная зависимость $N_3(t)$ числа позитронов $\mu^+ \rightarrow e^+$ распада вылетающих по импульсу, пучка, описывалась с помощью метода максимального правдоподобия выражением:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_0} [1 - a e^{-\lambda t} P(t)], \quad (4)$$

где $\tau_0 \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$ сек — время жизни μ^+ -мезона, a — коэффициент асимметрии $\mu^+ \rightarrow e^+$ -распада; λ — скорость релаксации спина μ^+ -мезона. При анализе экспериментального спектра $N_3(t)$ в интервале $t = 6 - 280$ нсек получены следующие значения ν_{12} и ν_{23} :

$$\nu_{12} = 487,08 \pm 0,07 \text{ МГц}, \quad \nu_{23} = 627,55 \pm 0,14 \text{ МГц}.$$

На рис.2 приведено фурье-преобразование полученного экспериментального спектра $N_3(t)$. Из экспериментальных значений ν_{12} и ν_{23} и формулы (3) следует, что частота сверхтонкого расщепления атома мюония в кварце $\nu_0^{\text{SiO}_2} = 4438 \pm 8$ МГц. Следует заметить, что обменные взаимодействия электрона мюония с электронами среды приводят к затуханию прецессии мюония и вносят систематическую ошибку в экспериментальную величину $\nu_0^{\text{SiO}_2}$. В данном эксперименте скорость релаксации $\lambda \approx 0,6$ мксек, что приводит, согласно формуле (25) работы [2], к смещению $\nu_0^{\text{SiO}_2}$ на величину $\Delta\nu/\nu \ll 10^{-4}$.

Таким образом, с помощью разработанной методики удалось определить величину $\nu_0^{\text{SiO}_2}$ с точностью 0,18%. Полученное значение $\nu_0^{\text{SiO}_2} = 4438 \pm 8$ МГц на три ошибки меньше вакуумного значения $\nu_0^{\text{SiO}_2} = 4463$ МГц. Это говорит о том, что взаимодействия примесного водородоподобного атома (мюония) с решеткой кварца приводят к незначительным искажениям его электронной структуры. Так как боровский радиус атома в 1S состоянии $r_0 \sim \nu_0^{-1/3}$, то из значения $\nu_0^{\text{SiO}_2} = 4438 \pm 8$ МГц следует, что боровский радиус мюония в кварце $r_0^{\text{SiO}_2} = 1,0017 \pm 0,0006 r_0$, где $r_0 = 0,5 \text{ \AA}$ — боровский радиус атома мюония в вакууме.

В заключение заметим, что предложенный метод определения частоты сверхтонкого расщепления атома мюония в средних магнитных полях может быть с успехом использован для точного измерения величины ν_0 мюония в полупроводниках.

Авторы приносят благодарность В.П.Джелепову за предоставленную возможность выполнить данную работу на синхротронном ОИЯИ, В.А.Суетину за помощь при изготовлении "встречных ФЭУ", Л.А.Левиной за помощь при обработке экспериментальных данных.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
28 мая 1979 г.

Литература

- [1] I.I.Gurevich, I.G.Ivanter, L.A.Makarjna, E.A.Meleshko, B.A.Nikolsky, V.S.Roganov, V.I.Selivanov, V.P.Smilga, B.V.Sokolov, V.D.Shestakov, I.V.Jakovleva. Phys. Lett., 29B, 387, 1969.

- [2] И.И.Гуревич, И.Г.Ивантер, Е.А.Мелешко, Б.А.Никольский, В.С.Роганов, В.И.Селиванов, В.П.Смилга, Б.В.Соколов, В.Д.Шестаков. ЖЭТФ, **60**, 471, 1971.
- [3] Е.А.Мелешко, А.Г.Морозов, А.И.Климов, Б.А.Никольский, В.И.Селиванов. Препринт ИАЭ-2320, М., 1973.
- [4] C.Ward et. al., Nucl. Instrum. and Methods., **30**, 61, 1964.
- [5] Е.А.Мелешко, В.И.Селиванов. Авт. свид. 509991, Бюллетень ОИПОЗ, 1976, №9, стр.170.
- [6] А.И.Климов, Е.А.Мелешко, А.Г.Морозов. ПТЭ, **3**, 95, 1975.
- [7] А.И.Климов, Е.А.Мелешко. ПТЭ, **3**, 100, 1976.
- [8] А.И.Климов, Е.А.Мелешко. ПТЭ, **4**, 125, 1977.
-