



TAREFAS

- Comprovação do efeito Hall em germânio dopado.
- Medição da tensão de Hall em dependência da corrente e do campo magnético à temperatura ambiente.
- Determinação do sinal, da densidade e da mobilidade dos portadores de carga à temperatura ambiente.
- Medição da tensão de Hall em dependência da temperatura da amostra.
- Determinação da temperatura de inversão e diferenciação entre condução extrínseca e intrínseca em germânio com dopagem tipo p.

OBSERVAÇÃO

A dependência da temperatura da condutividade elétrica dos cristais de germânio empregados é analisado mais detalhadamente na experiência UE6020100.



OBJETIVO

Análise dos mecanismos da condução elétrica em germânio dopado com o efeito Hall

RESUMO

O efeito Hall surge em materiais condutores de eletricidade que se encontram em um campo magnético  $B$ . O sinal da tensão de Hall se alterna conforme o caso se a mesma corrente  $I$  é carregada por portadores de carga positivos ou negativos. Seu valor depende da densidade do portador de carga. Por isto, o efeito Hall proporciona um instrumento importante para determinação dos mecanismos do transporte de cargas em semicondutores dopados. Na experiência, cristais dopados de germânio são analisados em temperaturas entre 300 K e 450 K, para diferenciar a condução de eletricidade possibilitada pela dopagem da condução própria possibilitada pela ativação de elétrons da banda de valência para a banda de condução.

APARELHOS NECESSÁRIOS

Número	Instrumentos	Artigo Nº
1	Aparelho básico para efeito Hall	U8487000
1	Ge dopado tipo n sobre placa condutora	U8487030
1	Ge dopado tipo p sobre placa condutora	U8487020
1	Sensor de campo magnético $\pm 2000$ mT	U11359
1	Bobina D com 600 espiras	U8497430
1	Núcleo em U	U8497215
1	Par de sapatas polares e tensores para o efeito de Hall	U8497205
1	Transformador com retificador 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)	U33300-230 ou
	Transformador com retificador 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)	U33300-115
1	Fonte de alimentação DC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	U33020-230 ou
	Fonte de alimentação DC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	U33020-115
1	Multímetro digital P3340	U118091
1	3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)	U11300-230 ou
	3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)	U11300-115
1	Conjunto de 15 cabos de segurança para experiências, 75 cm	U138021
<b>Adicionalmente recomendado:</b>		
1	3B NETlab™	U11310

FUNDAMENTOS GERAIS

O efeito Hall surge em materiais condutores de eletricidade que se encontram em um campo magnético  $B$ . Ele tem origem na força de Lorentz, que desvia os portadores de carga envolvidos na corrente elétrica  $I$  por uma amostra de material perpendicularmente ao campo magnético e à direção da corrente. A separação da carga ocasiona um campo elétrico  $E_H$  perpendicular à direção da corrente que compensa a força de Lorentz e gera uma tensão de Hall  $U_H$  entre as bordas da amostra. O sinal da tensão de Hall se alterna conforme o caso se a mesma corrente  $I$  é carregada por portadores de carga positivos ou negativos. Seu valor depende da densidade do portador de carga. Por isto, o efeito Hall proporciona um instrumento importante para determinação dos mecanismos do transporte de cargas em materiais condutores de eletricidade, que frequentemente é empregado para a análise de semicondutores dopados.

Na experiência, cristais dopados de germânio são analisados em temperaturas entre 300 K e 450 K. Os cristais se apresentam como amostras chatas com comprimento  $a$ , largura  $b$  e espessura  $d$ , pelas quais a corrente  $I$  flui transversalmente. O campo magnético  $B$  atravessa a amostra perpendicularmente à corrente. Disto, resulta a tensão de Hall

$$(1) \quad U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

com os coeficientes de Hall

$$(2) \quad R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}$$

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  As: carga elementar

As densidades  $n_n$  dos elétrons na banda condutora,  $n_p$  dos elétrons defeituosos na banda de valência, assim como a mobilidade  $\mu_n$  dos elétrons e  $\mu_p$  dos elétrons defeituosos são grandezas materiais e dependem da temperatura  $T$  da amostra.

Adicionalmente à tensão de Hall, a queda de tensão  $U$  em direção transversal da amostra é medida na experiência, para determinar a condutibilidade elétrica

$$(3) \quad \sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p)$$

e a chamada mobilidade de Hall

$$(4) \quad \mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n}$$

As densidades dos portadores de carga  $n_n$  e  $n_p$  são influenciadas pela dopagem, ou seja, pela inclusão de átomos estranhos no cristal. No caso de dopagem tipo p, os átomos aceitantes ligam elétrons da banda de valência, causando assim furos na banda de valência – os chamados elétrons defeituosos. No caso da dopagem tipo n, os átomos doadores dão, respectivamente, um elétron para a banda condutora.

Os cristais dopados são eletricamente neutros, as cargas negativas e as positivas, portanto, se igualam. Assim, vale

$$(5) \quad n_n + n_A = n_p + n_D$$

$n_A$ : Concentração dos aceitantes

$n_D$ : Concentração dos doadores

Além disso,  $n_n$  e  $n_p$  são acoplados por uma lei de efeito de massa, pois um número igual de pares de elétrons-elétrons defeituosos se formam e se recombinam em equilíbrio dependente da temperatura por unidade de tempo. Vale:

$$(6) \quad n_n \cdot n_p = n^2$$

$n$  densidade do portador de carga em condutividade própria pura (vide experiência UE6020100)

No total, vale, portanto,

$$(7) \quad n_n = \sqrt{n^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}$$

$$(8) \quad n_p = \sqrt{n^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}$$

À temperatura ambiente, as concentrações  $n_A$  ou  $n_D$  são substancialmente maiores que a densidade do portador de carga em condutividade própria pura  $n$ . Portanto, vale

$$(9) \quad R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e}, \quad \mu_H = -\mu_n$$

com dopagem tipo n e 300 K

$$(10) \quad R_H = \frac{1}{n_A \cdot e}, \quad \mu_H = \mu_p$$

com dopagem tipo p e 300 K

Sinal e densidade dos portadores de carga podem, assim, ser lidos diretamente do coeficiente de Hall. A mobilidade dos portadores de carga corresponde à mobilidade de Hall.

ANÁLISE

Dado que, com a temperatura ascendente, cada vez mais portadores de carga para o transporte de corrente estão à disposição, a tensão de Hall diminui até atingir o valor zero.

Para germânio com dopagem tipo p, o sinal da tensão de Hall se altera, pois, com condutividade própria ascendente, domina a influência dos elétrons cuja mobilidade  $\mu_n$  é maior. Abaixo da chamada temperatura de inversão, a condução elétrica possibilitada pela dopagem domina, acima da temperatura de inversão, domina a condutividade própria.

Com altas temperaturas, os cristais com dopagem tipo n e os com dopagem tipo p não podem mais ser diferenciados, pois

$$n_n = n_p = ni, \quad R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}, \quad \mu_H = -(\mu_n - \mu_p)$$

A dependência da temperatura das mobilidades  $\mu_n$  e  $\mu_p$  não é perceptível no coeficiente de Hall, pois, em ambos os casos, vale:

$$\mu \sim T^{-3/2} \text{ (vide experiência UE6020100)}$$

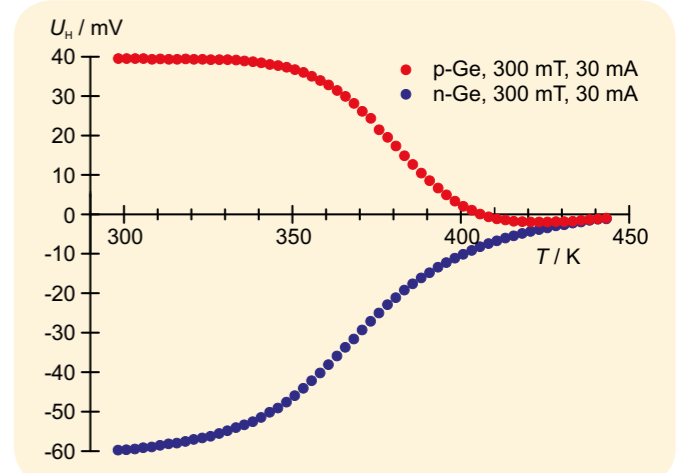


Fig. 1: Tensão de Hall em germânio com dopagem tipo p e tipo n como função da temperatura  $T$