

EXPERIENCIA ACADÉMICA CON EL PREMIO NOBEL EN FÍSICA 2007: PROF. DR. PETER GRÜNBERG

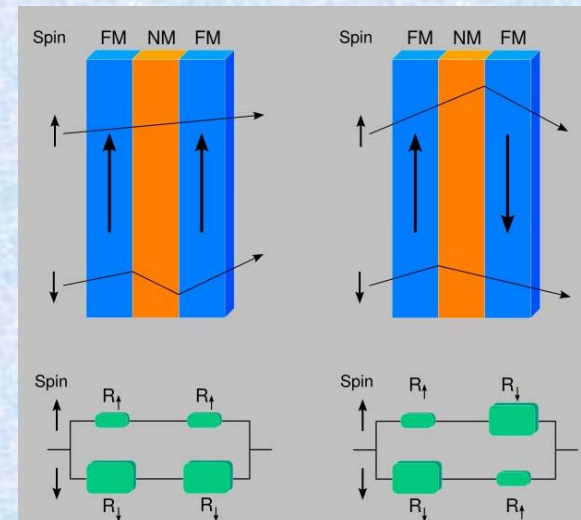
Manuel Mirabal García

IF-UASLP

78000 San Luis Potosí, S.L.P., México



Prof. Dr. Peter Grünberg

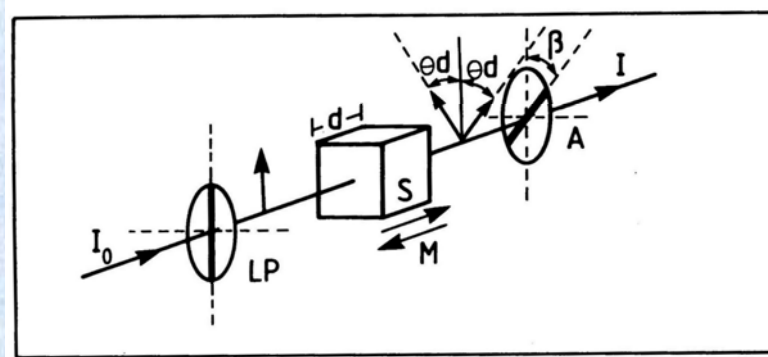


(GMR)

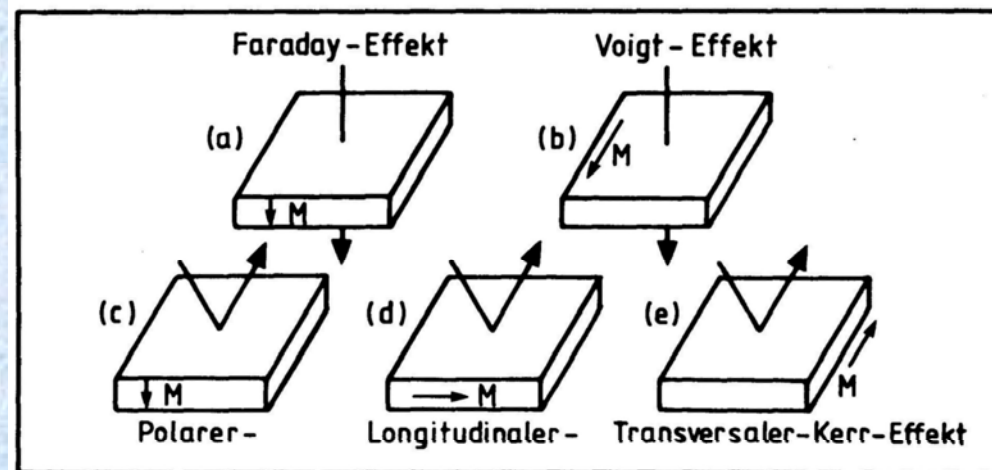
MAGNETO-OPTICA EN PELICULAS DELGADAS

- **Mediciones magneto-ópticas en películas delgadas ferromagnéticas de EuS, EuO, Fe, Gd y $\text{Eu}_x\text{Sr}_{1-x}\text{S}$, crecidas epitaxialmente sobre Silicio.**
 - a). **Observación de dominios magnéticos usando el efecto magneto-óptico de Kerr (MOKE).**
 - b). **Determinación magneto-óptica de la temperatura de Curie.**
- **Experimentos de dispersión de luz por ondas acústicas de espín.**
- **El descubrimiento de la magneto-resistencia gigante (GMR).**
- **Conclusiones**

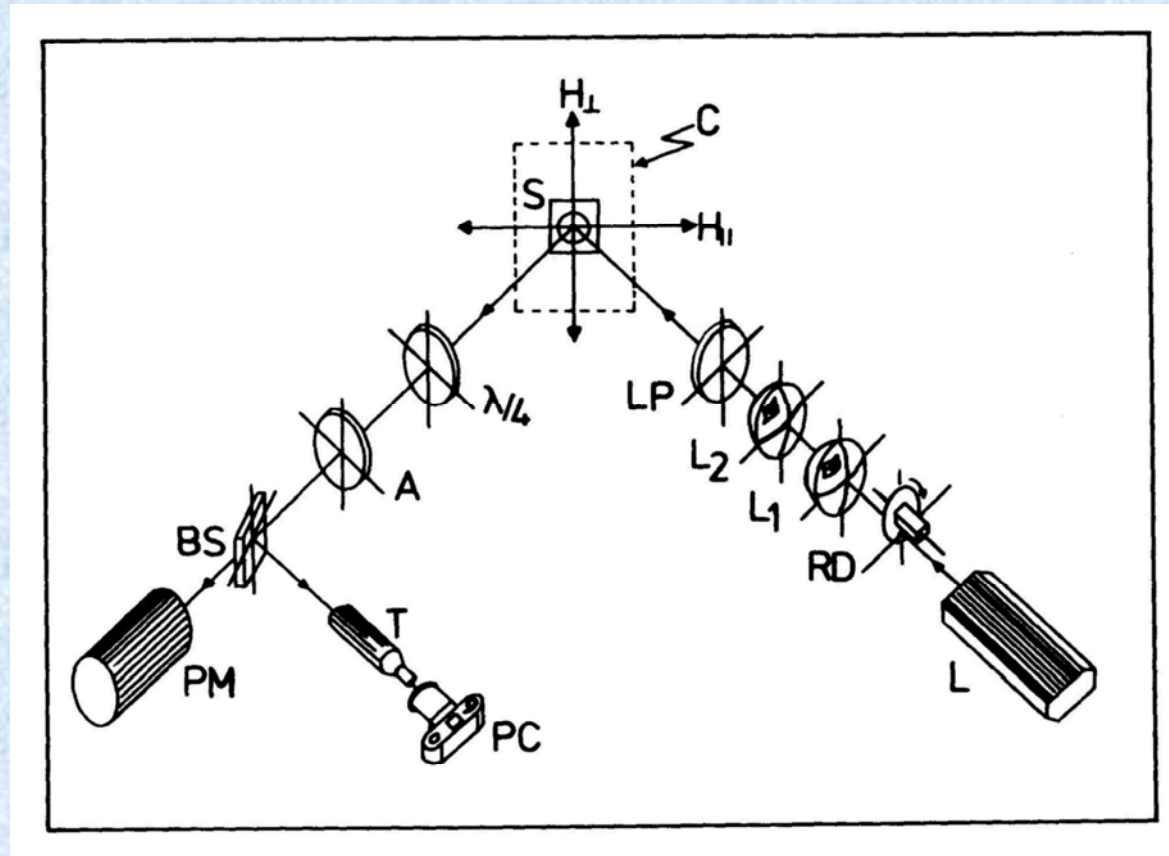
EFFECTO MAGNETO-OPTICO



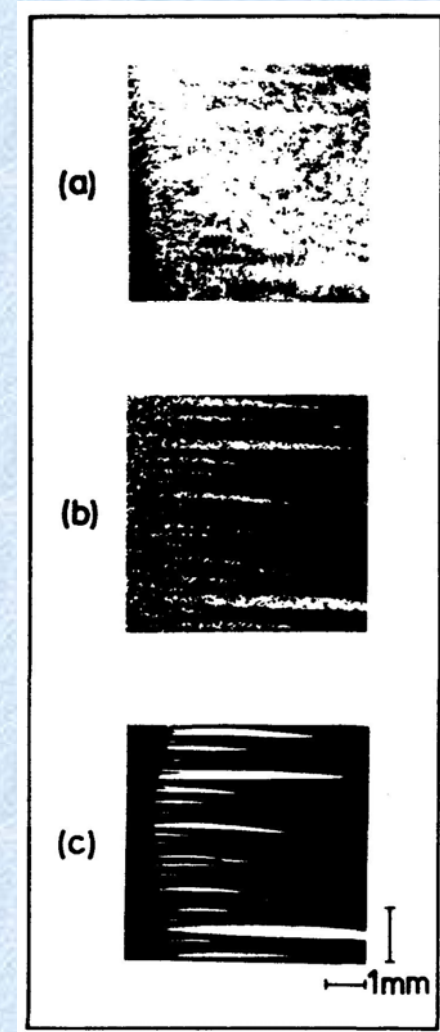
Rotación de Faraday: $I = I_0 \exp(-\alpha d) \sin^2(\beta \pm \theta d)$



MONTAJE EXPERIMENTAL PARA MEDICIONES A BAJAS TEMPERATURAS DEL EFECTO MAGNETO-OPTICO DE KERR

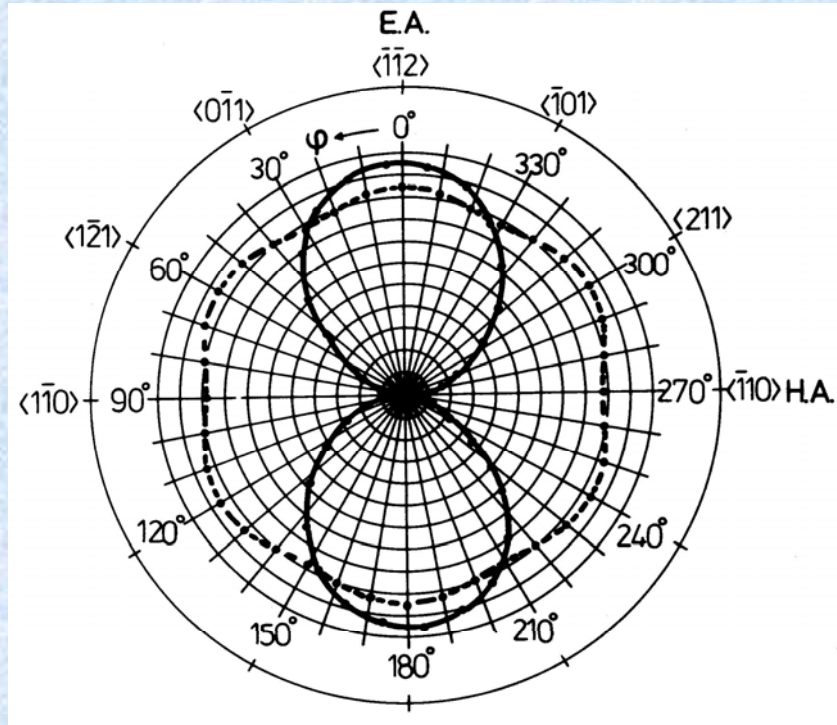


MOKE



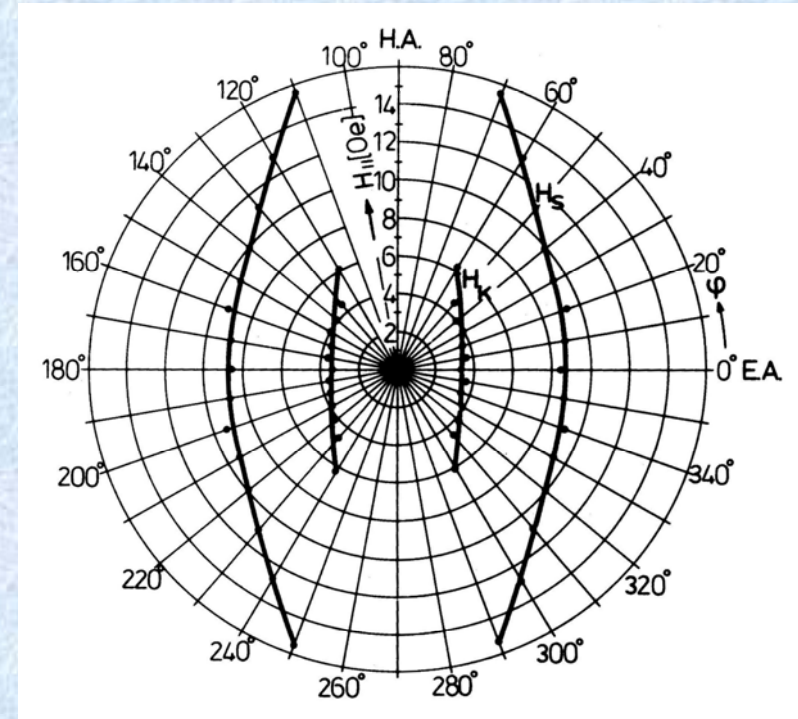
Estructura de dominios magnéticos para $T = 7\text{K}$ y $H_{\text{ext}} = 5\text{ Oe}$ (paralelo al E.A.)

MEDICIONES DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA Y MEDICIONES MAGNETO-OPTICAS EN EuS(111) d = 100 nm, T = 6 K



Medición de la susceptibilidad magnética $\chi_c(\varphi)$ en función del ángulo φ a 50 Hz, para una película de EuS/(111)-Si con anisotropía uniaxial (curva sólida). La curva segmentada es la que se esperaría teóricamente.

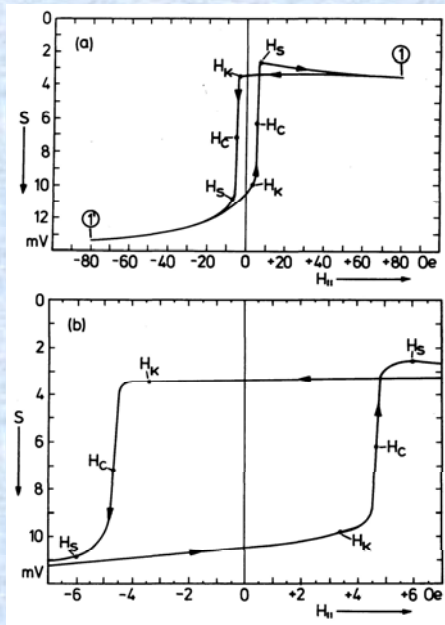
Existen diferencias en los coeficientes de expansión térmica entre el Si y el EuS.



Mediciones magneto-ópticas (LMOKE) del campo de germinación de dominios, $H_K(\varphi)$ y el campo de saturación, $H_S(\varphi)$. El campo coercitivo, H_C , corresponde al valor para el cual, la mitad de los dominios presentan una magnetización antiparalela a la otra mitad; tal configuración corresponde a un estado de magnetización neta cero en la dirección del campo externo aplicado H_{ext} .

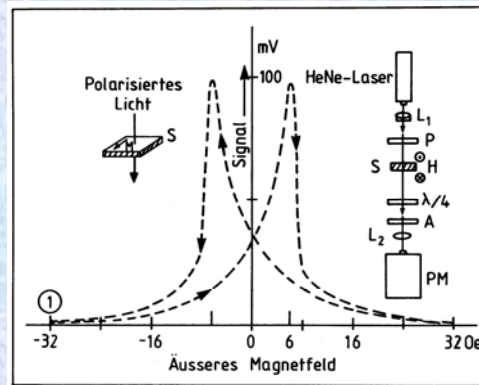
$$H_{K,S}(\varphi) \cos(\varphi) = H_{K,S}(\varphi = 0)$$

CURVAS DE HISTERESIS PARA PELICULAS DELGADAS DE EuS (MOKE)

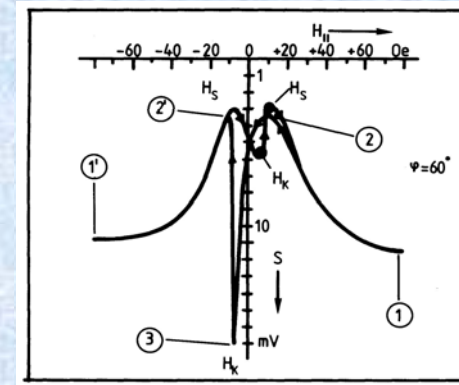


LMOKE

Hext paralelo al E.A. ($\varphi = 0^\circ$)



EFEECTO VOIGT

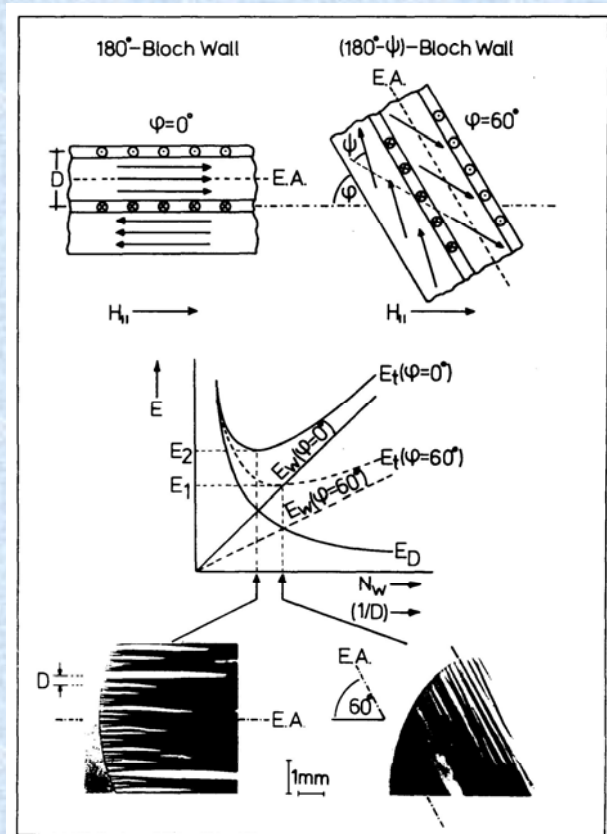


EFEECTO KERR

Hext es aplicado bajo un ángulo $\varphi = 60^\circ$ con respecto al E.A.

ENERGIAS MAGNETICAS PARA $\text{EuS}(111)$, EN FUNCION DEL NUMERO DE PAREDES, N_w , O DEL RECIPROCO DEL ANCHO, D , DE LOS DOMINIOS MAGNETICOS

$d = 100 \text{ nm}$, $T = 7 \text{ K}$



φ es el ángulo entre el E.A. y el H_{ext}

$H_{ext} = 5 \text{ Oe}$ (para $\varphi = 0^\circ$)

$H_{ext} = 8.5 \text{ Oe}$ (para $\varphi = 60^\circ$)

La energía total, E_t , es la suma de la energía de las paredes, E_w , y de la energía magnetostática, E_D (los dominios siempre crecen en la dirección del E.A.). El número de paredes y de dominios aumenta con el ángulo; y el ancho de los dominios decrece correspondientemente.

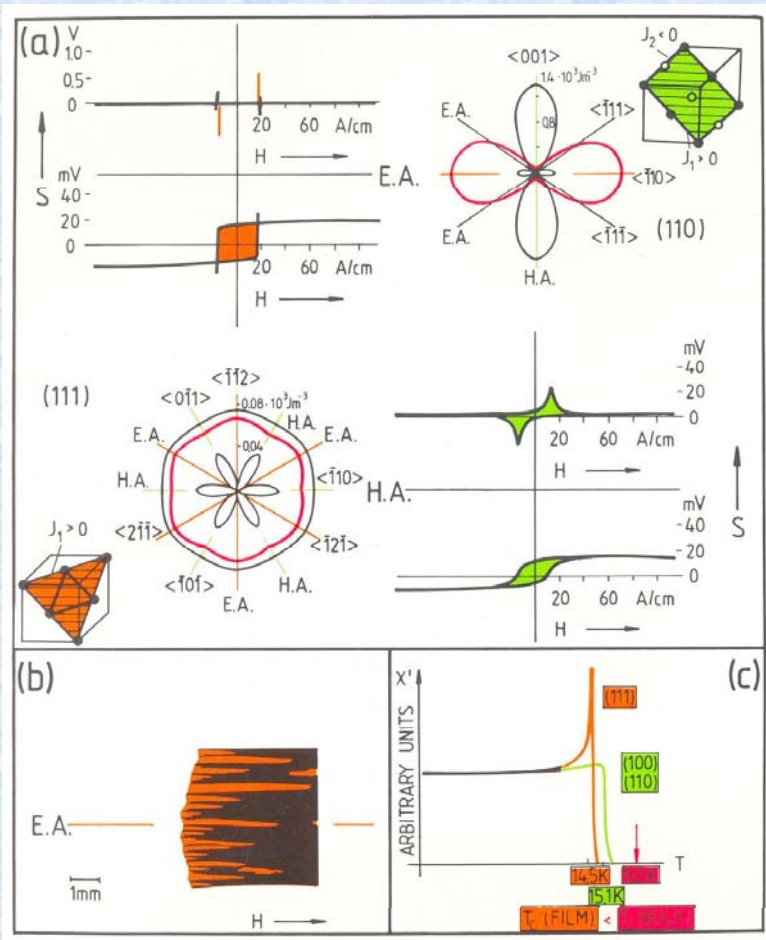
El campo H_{ext} se aplicó en el plano de la muestra y paralelo a la polarización del haz incidente (Polarización P).

PROPIEDADES FERROMAGNETICAS CARACTERISTICAS DE PELICULAS DELGADAS DE EuS/(111)-Si y EuS/(110)-Si

CRISTAL FERROMAGNETICO CUBICO

$$E_K(\varphi) = K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots)$$

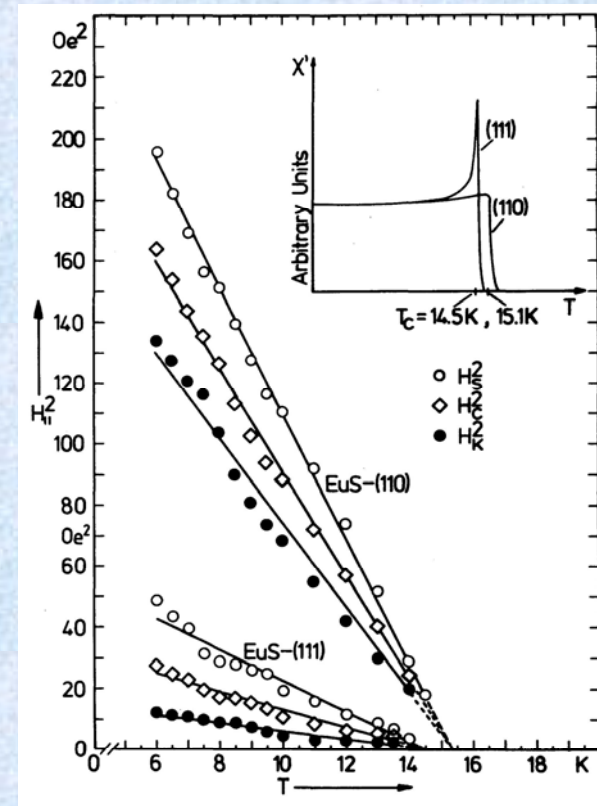
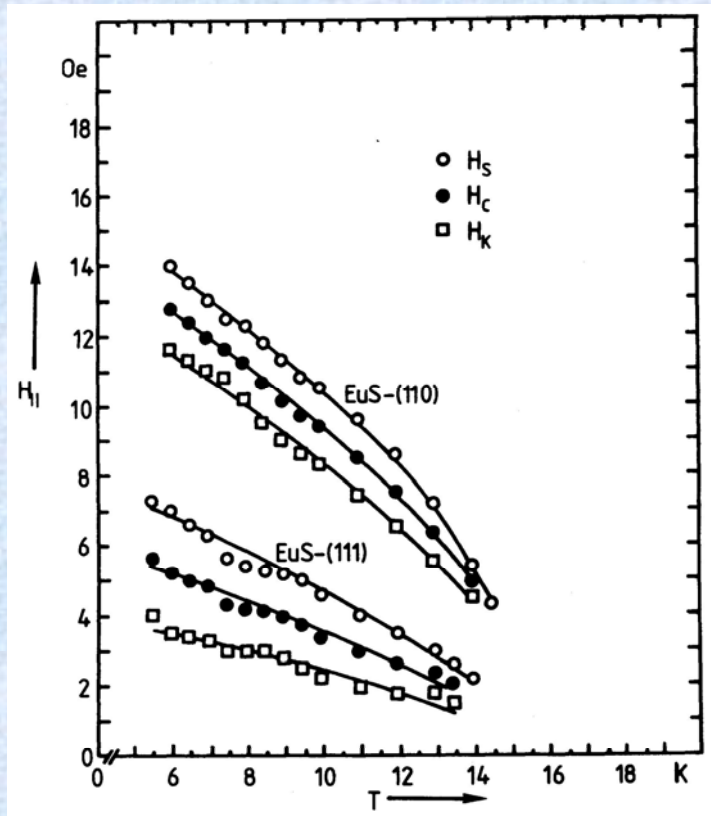
- Para EuS (Vol): $K_1 = -4.3 \text{ kJ/m}^3$, $K_2 = +2.1 \text{ kJ/m}^3$. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, son los cosenos directores de la magnetización con respecto a los tres ejes cristalográficos de la celda unitaria. Para un plano (hkl) las $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, pueden ser expresadas en función de un ángulo φ entre la magnetización en la película y una dirección cristalográfica. $\varphi = 0$ indicaría un eje fácil (E.A.) de la magnetización ($E_k = -E_{k,EA}$). La parte anisotrópica es cero.
- Dependencia angular de la Susceptibilidad $\chi_c(\varphi)$ a 50 Hz, para EuS(110) y EuS(111), curvas rojas. La curva exterior (negra) de EuS(111) corresponde a la energía magnetocrystalina $E_k(\varphi)$; la curva interior (negra) corresponde a la parte anisotrópica de la energía magnetocrystalina $E_{k,a}(\varphi)$. También se muestran dos ciclos de histéresis: uno en el eje fácil (E.A.) y el otro en el eje difícil (H.A.).
- Estructura de dominios magnéticos obtenida con LMOKE a $T=7 \text{ K}$ usando un láser de He-Ne, el campo aplicado fue de 50e.
- Dependencia de la susceptibilidad en función de la temperatura para EuS(111) y EuS(110). $T_c = 14.5 \text{ K}$ para EuS(111); y $T_c = 15.1 \text{ K}$ para EuS(110); $T_c(\text{Vol}) = 16.5 \text{ K}$.



$d = 100 \text{ nm}$

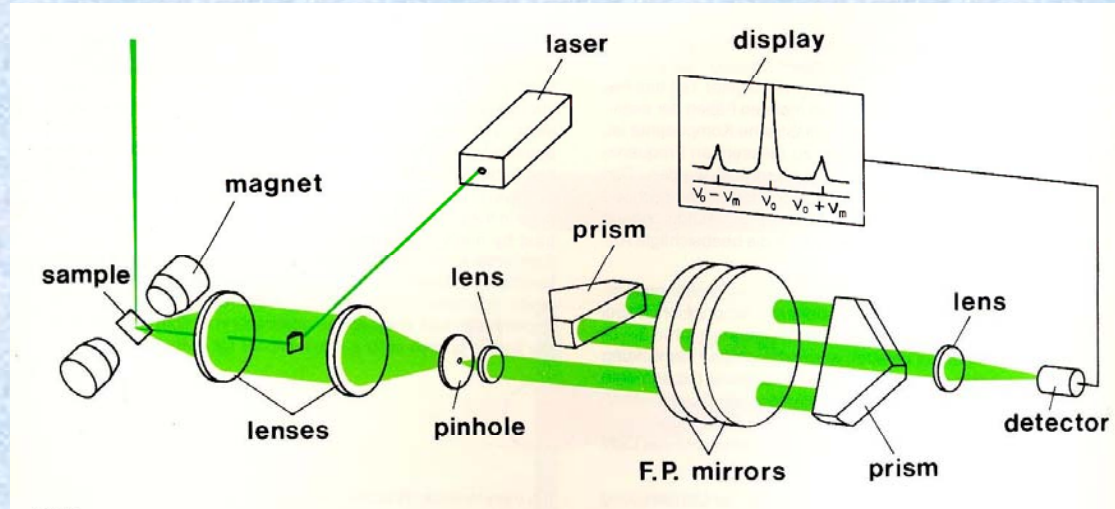
W. Zinn, B. Saftic, N Rasula, M. Mirabal, and J. Köhne, "EuS ferromagnetic semiconductor films grown epitaxially on silicon", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 35 (1983) 329-336.

DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE CURIE UTILIZANDO EL MOKE



M. Mirabal-García, P. Grünberg, and W. Zinn, "Magneto-optical studies of epitaxial EuS films on silicon", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 28 (1982) 313-318.

DISPERSION DE LUZ POR ONDAS ACUSTICAS DE ESPIN EN PELICULAS DELGADAS FERROMAGNETICAS



Espectrómetro de Brillouin* con un interferómetro de Fabry-Perot de tres pasos. En los experimentos se utilizó uno de cinco pasos (J.R. Sandercock**).

En los experimentos los corrimientos de frecuencia relativos a la frecuencia de la luz incidente, para la mayoría de los líquidos y sólidos, es: $(\Delta\omega/\omega_0) \sim 10^{-5}$

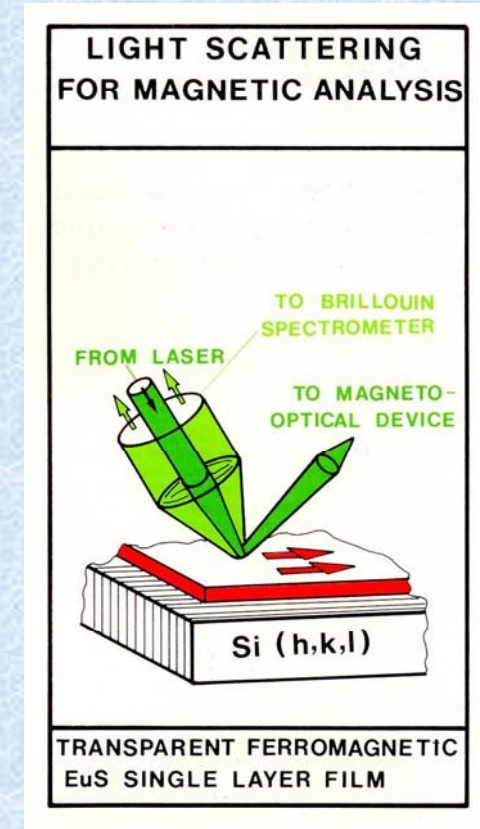
$$q = 2(2\pi/\lambda_0)\cos(45^\circ)$$

Para $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$, $q = 1.4 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$

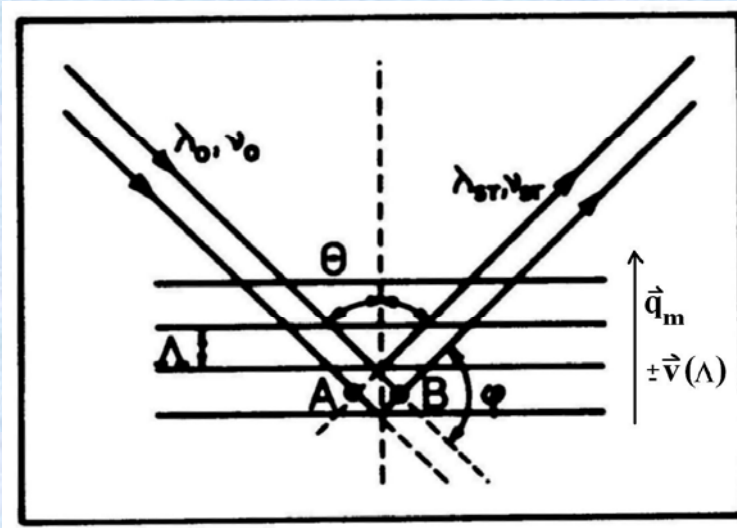
Para $\lambda_0 = 488.0 \text{ nm}$, $q = 1.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$

* L. Brillouin, Ann. Phys. (N.Y.), 17, (1922) 88

** J.R. Sandercock, Proc. 2nd intl. Conf. Light Scatt. In Solids, Flamaron, Paris (1971) 9.



DISPERSION DE LUZ POR ONDAS DE ESPÍN



\mathbf{q}_m es el vector de onda de la excitación colectiva; y

$\pm v(\Lambda)$ es la velocidad de fase de la onda de espín

La onda incidente con vector de onda \mathbf{K}_0 es reflejada por el frente de onda de la excitación colectiva (onda de espín).

$$\hbar\omega_m \ll K_B T$$

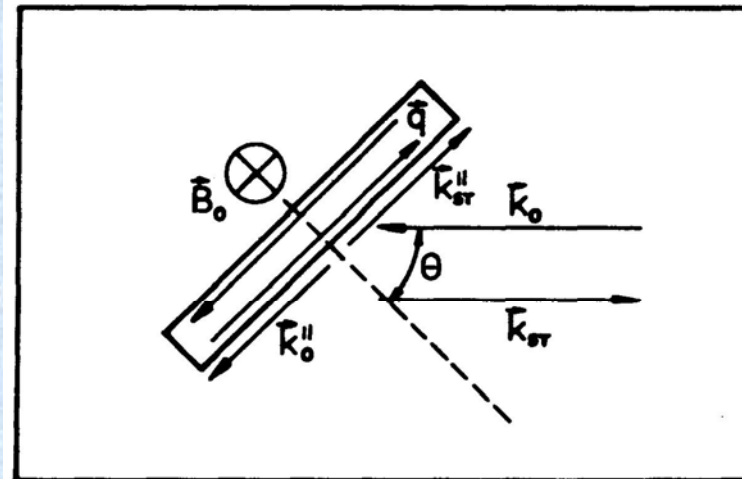
En analogía con la condición de Bragg en la cristalografía:

$$\mathbf{K}_{ST} = \mathbf{K}_0 \pm \mathbf{q}_m$$

Lo que da lugar a un desplazamiento Doppler:

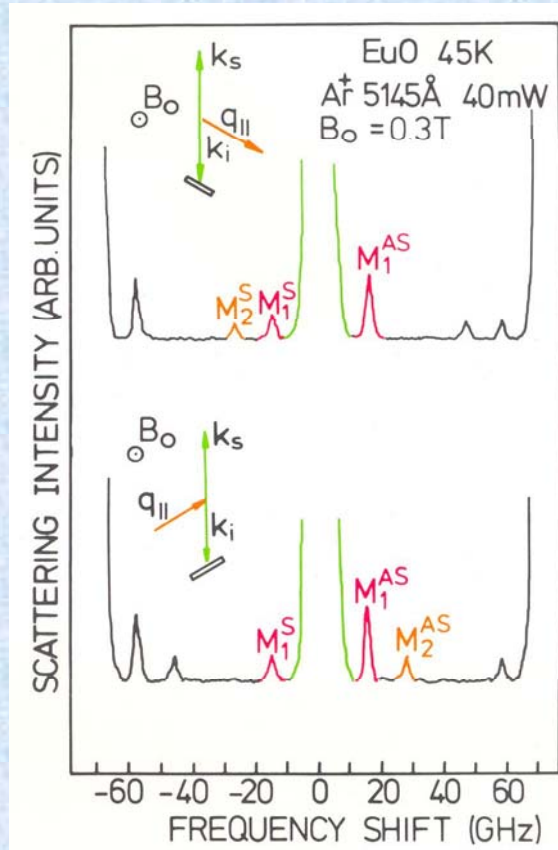
$$v_{ST} = v_0 \pm v_m$$

$$q_m = 2(2\pi/\lambda_0)\cos(45^\circ)$$

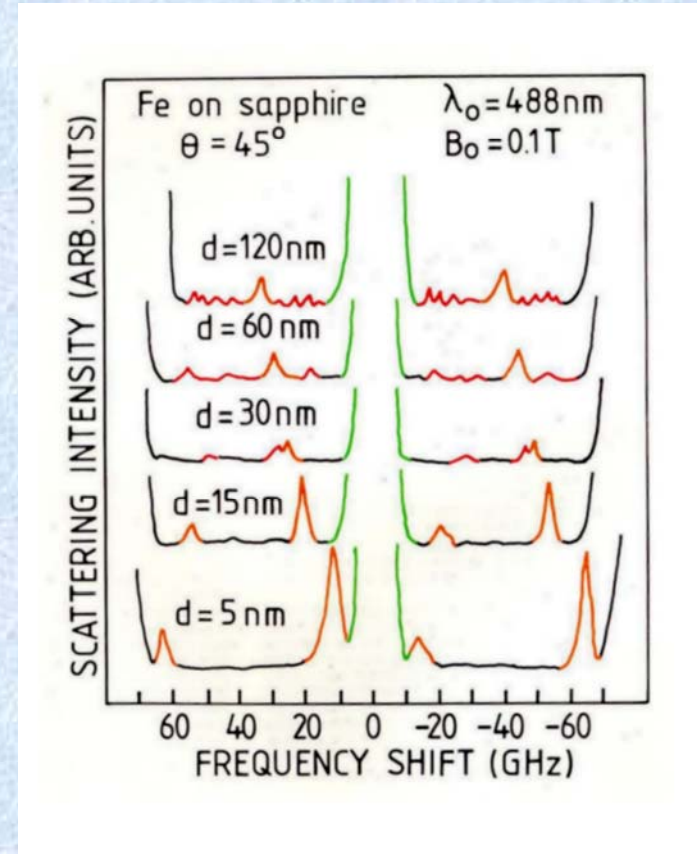


Geometría experimental: $\theta = 45^\circ$

ESPECTROS DE DISPERSION DE LUZ POR ONDAS DE ESPIN



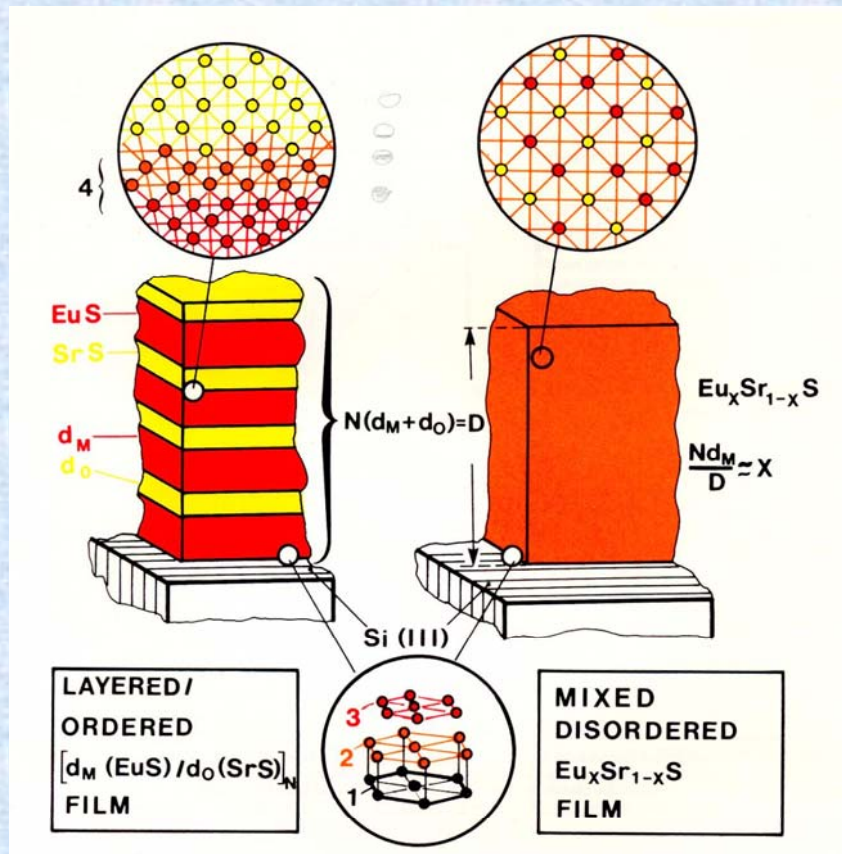
Espectros para dos ángulos de incidencia $\pm \theta$ (diagramas vectoriales), donde se muestra la asimetría en las intensidades (Stokes-Antistokes), para los modos de volumen (M_1) y los modos de superficie (M_2). La dirección de propagación de la onda de espín siempre es de izquierda a derecha, para la misma orientación de B_0 .



Espectros de dispersión de luz por ondas de espín de superficie (naranja) para diferentes espesores de las capas de Fe. Nótese el fuerte incremento en la intensidad a medida que "d" decrece. Los picos rojos corresponden a modos estacionarios.

ESTUDIOS MAGNETO-OPTICOS EN FERROMAGNETOS CRECIDOS EPITAXIALMENTE

Estudio de fenómenos de orden atómico en ferromagnetos en multicapas (ordenados) y homogéneamente mezclados (desordenados)

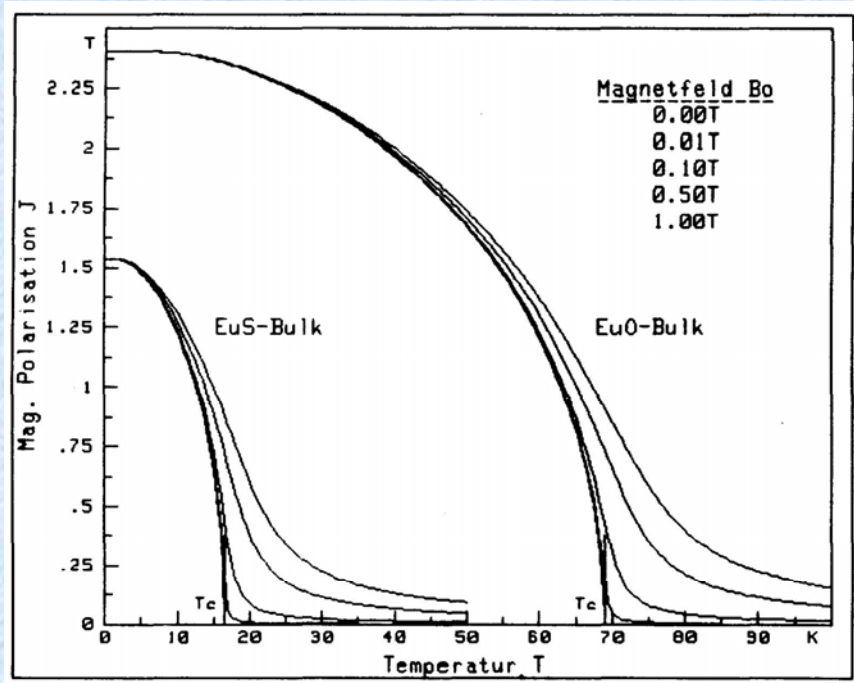


En la figura se indica el desajuste entre las redescristalinas del sustrato (1) y la película en ambos casos.

Las capas (2), (3) y (4) son deformadas y estiradas por el efecto atribuido a la red del (111)-Si. En el caso del vidrio de espín $\text{Eu}_x\text{Sr}_{1-x}\text{S}$, los esfuerzos desaparecen con el espesor D.

TEORIA FENOMENOLOGICA DEL FERROMAGNETISMO

“Teoría del Campo Molecular”



Para la determinación de la magnetización:

$$M(T,H)/M(0) = B_J(x), \text{ donde } x = [(J \mu_0 \cdot g \mu_B)/K_B T][H + \lambda_M]$$

y

$$T_C = [N \mu_0 \cdot g^2 [J(J+1)] \mu_B^2 / 3K_B] \lambda$$

Dependiendo de cómo se acoplan los momentos magnéticos atómicos en un cristal, aparece la magnetización espontánea, M , en los sólidos.

Las fuerzas de intercambio entre los momentos magnéticos, responsables del acoplamiento paralelo son de naturaleza cuántica (Heisenberg).

La teoría del CM se supone la existencia de un campo interno homogéneo, hipotético H_w en la red cristalina, responsable de la magnetización espontánea; el cual es proporcional a ésta:

$$H_w = \lambda_M$$

Mec. Cuánt.: cada átomo está caracterizado por sus Núm. Cuánt. Característicos L, S, J y $M_J, -J \leq M_J \leq J$; así la componente del momento magnético en la direcc. del campo H está dada por: $\mu_{T,H} = M_J \cdot g \mu_B$

Entonces, la componente max. en la direcc. de un campo ext. aplicado es:

$$\mu_S = J \cdot g \mu_B$$

Para N momentos magnéticos por unidad de volumen, la M total del sistema es:

$$M = N J \cdot g \mu_B B_J(x)$$

La magnetización espontánea o magnetización de saturación es:

$$M_S = M_{\max} = M(0) = N J \cdot g \mu_B$$

PARAMETROS RELEVANTES DE EuS y EuO PARA LA EVALUACION NUMERICA DE LOS EXPERIMENTOS DE DISPERSION DE LUZ POR ONDAS DE ESPIN

Kristall	Curie-Temp. (BULK)	Gitterkonst.	Spontane Polarisation (T = 0)	Molekular- feldkonst.	Spinwellen- vektor
EuS $\xi = 1.88 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$	16.5 K	5.968 Å	1.535 T	5.334	$1.4 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ $(\lambda_0 = 632.8 \text{ nm})$ und $1.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ $(\lambda_0 = 488 \text{ nm})$
EuO $\xi = 2.94 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$	69.5 K	5.141 Å	2.401 T	14.362	

R.W. Damon y J.R. Eshbach* utilizaron la aproximación dipolar para examinar los modos de superficie y de volumen de una onda de espín en una placa ferromagnética que dispersa la luz incidente.

Las frecuencias de ambos modos están dadas por:

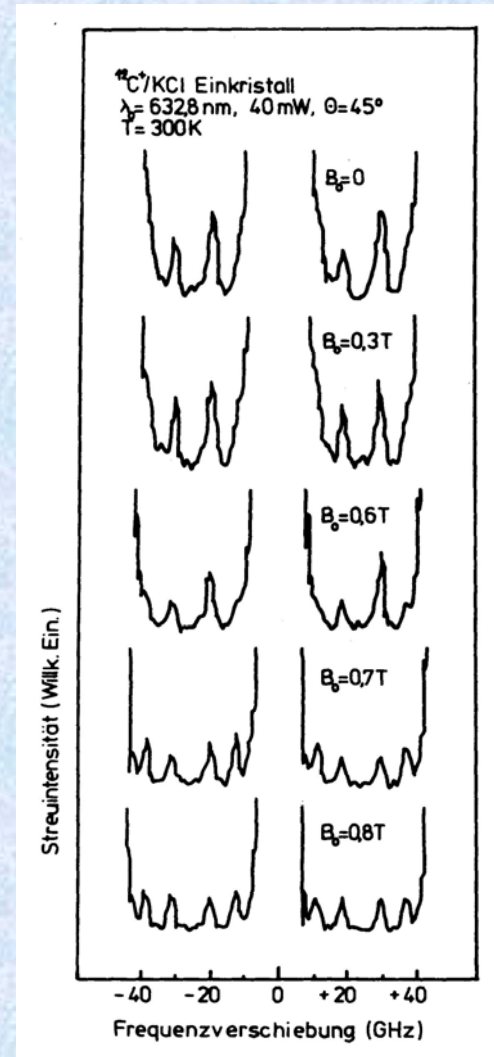
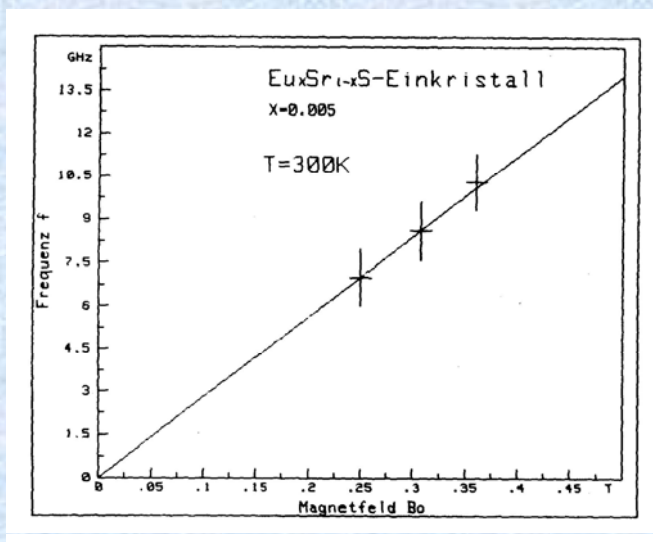
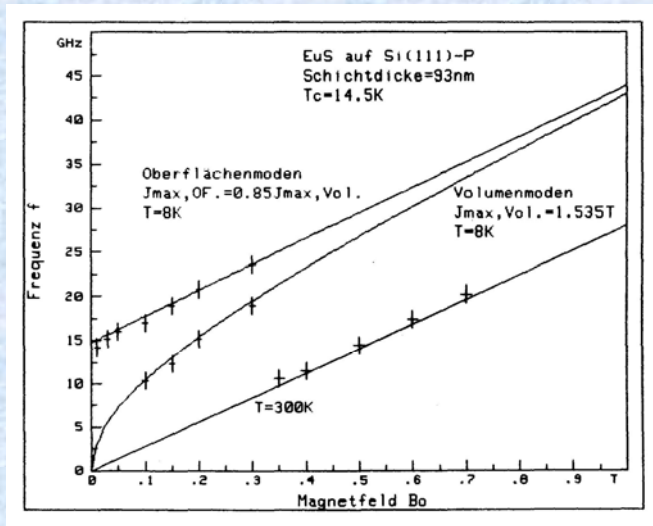
$$\nu_{V.S.W.} = (\gamma/2\pi)[B_0(B_0 + J)]^{1/2}; \text{ y}$$

$$\nu_{O.S.W.} = (\gamma/2\pi)[B_0^2 + B_0J + (J^2/4)(1 - \exp(-2|q|d))]^{1/2}$$

(Las longitudes de onda de las ondas de espín son muy grandes comparadas con la constante de la red).

*R.W. Damon and J.R. Eshbach, *J. Phys. Chem. Solids* 19 (1961) 308.

ALGUNOS RESULTADOS DE LA DISPERSION DE LUZ POR ONDAS DE ESPIN Y OBSERVACION DE RESONANCIA PARAMAGNETICA



M. Mirabal, P. Grünberg, and W. Zinn, "Observation of paramagnetic lightscattering from EuO, EuS, Eu_{0.005}Sr_{0.995}S and Gd", Solid State Communications, 52, No.11 (1984) 929-931.

UNIVERSIDAD DE COLONIA, ALEMANIA, FEBRERO DE 1984



Graduados con el Prof. Dr. Werner Zinn (*Doktorvater*)

UNIVERSIDAD DE COLONIA, ALEMANIA, FEBRERO DE 1984



Colaboradores del Prof. Dr. Peter Grünberg: Premio Nobel en Física 2007



EL DESCUBRIMIENTO DE LA MAGNETO-RESISTENCIA GIGANTE

GMR: Estructura simple de tres capas Fe/Cr/Fe

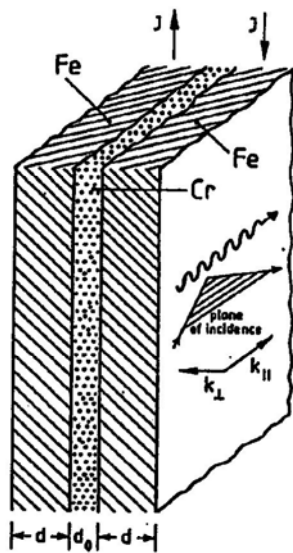


FIG. 1. Ferromagnetic double layer with antiparallel alignment of the magnetizations. Also indicated is the plane of incidence of the laser light for the observation of light scattering from spin waves and hysteresis curves via MOKE.

Muestras epitaxiales crecidas sobre (110)-GaAs; $d = 12 \text{ nm}$, $d_0 = 1 \text{ nm}$
 E.A a lo largo de la dirección [100]; H.A. a lo largo de la dirección [110].

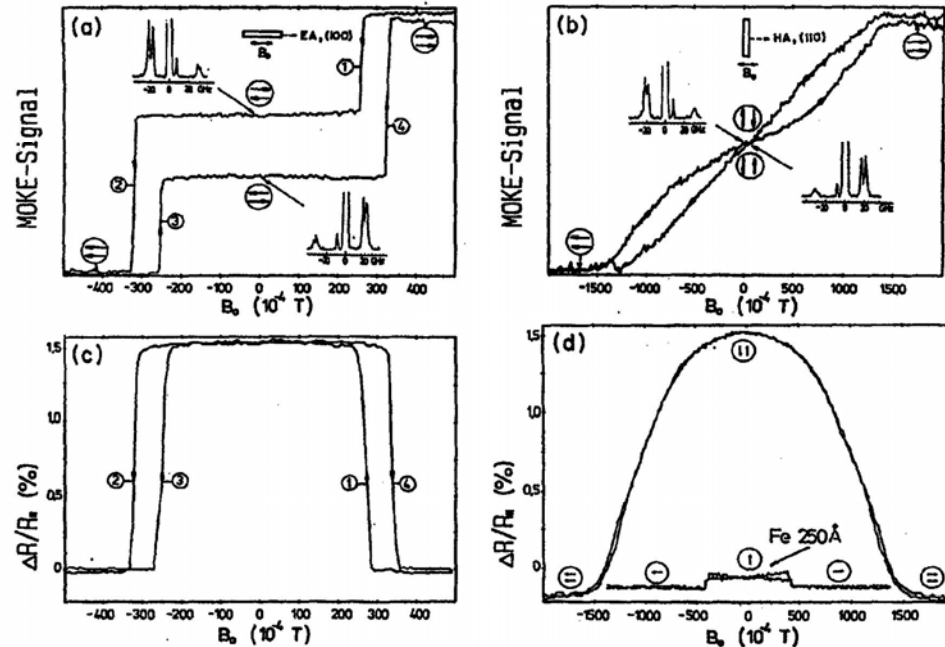


FIG. 2. (a)-(b) MOKE hysteresis curves and (c)-(d) magnetoresistance $\Delta R/R_1 = (R - R_1)/R_1$ from Fe double layers with anti-ferromagnetic coupling. Also, (d) displays the anisotropic MR effect of a 250-Å-thick Fe film.

Acoplamiento de intercambio entre dos películas ferromagnéticas a través de una intercapa de un material antiferromagnético. Los dos métodos utilizados para reconocer el acoplamiento AFM ó FM son: MOKE y LS

G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, Phys. Rev. B, 39, No. 7 (1989) 4828-4830.

DESARROLLO DE LA DENSIDAD DE BITS POR PULGADA CUADRADA EN LOS DISCOS DUROS (1984-2000)



Prof. Dr. Albert Fert y Prof. Dr. Peter Grünberg

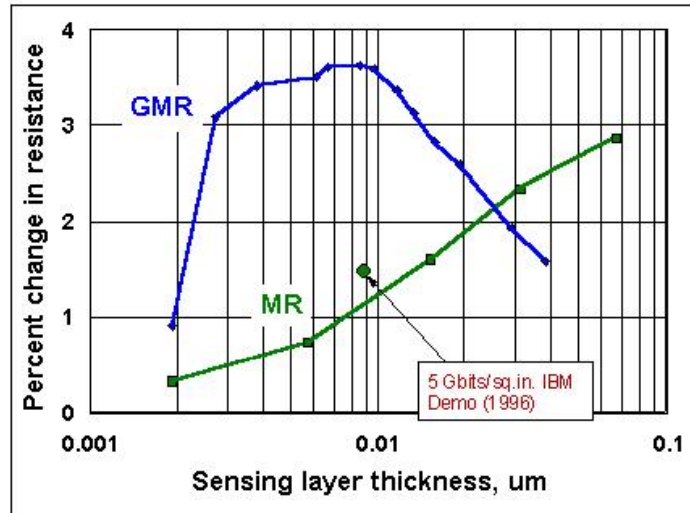


Figure 4. Percent change in resistance of MR and GMR sensors

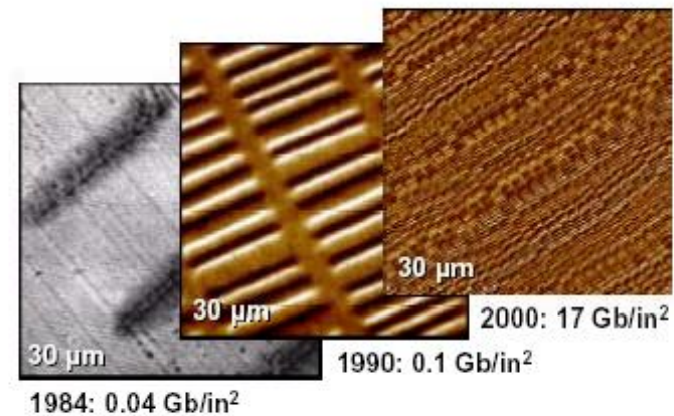
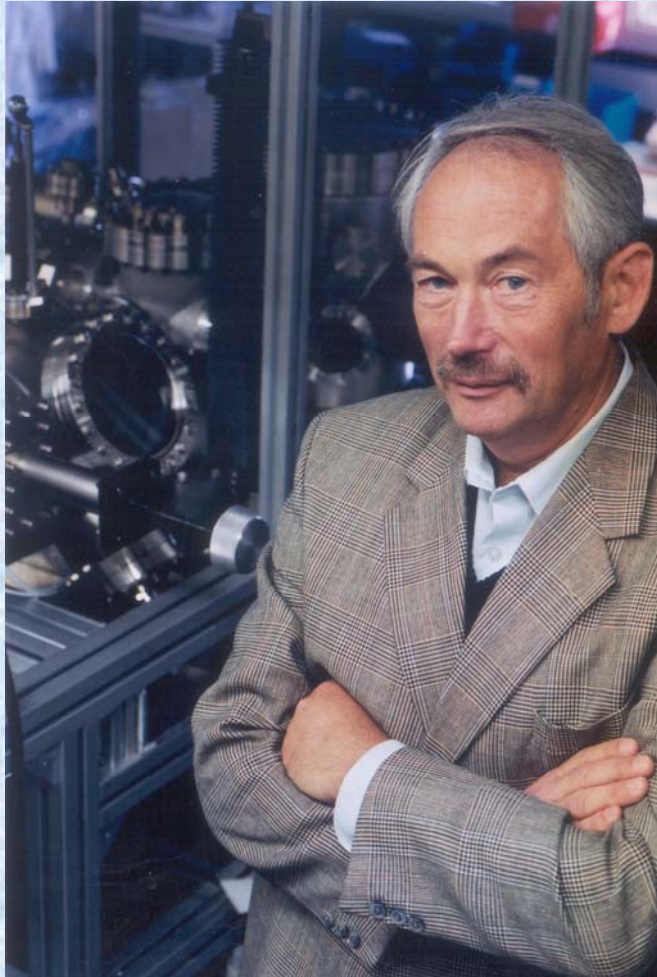


Abbildung 9.19: Visualisierung der Entwicklung der Speicherdichte in Festplattenlaufwerken. Gezeigt sind die Bitmuster in einer Fläche von $30 \times 30 \mu\text{m}^2$. Die Aufnahmen wurden mit magnetooptischen Methoden bzw. mit einem Magnetischen Kraftmikroskop erhalten (Quelle: IBM Deutschland Speichersysteme GmbH).

M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices", Phys. Rev. Lett., 61, No. 21 (1988) 2472-2475.

EVOLUCION DE LAS CABEZAS LECTORAS DE DATOS (1985-2005)



Prof. Dr. Peter Grünberg

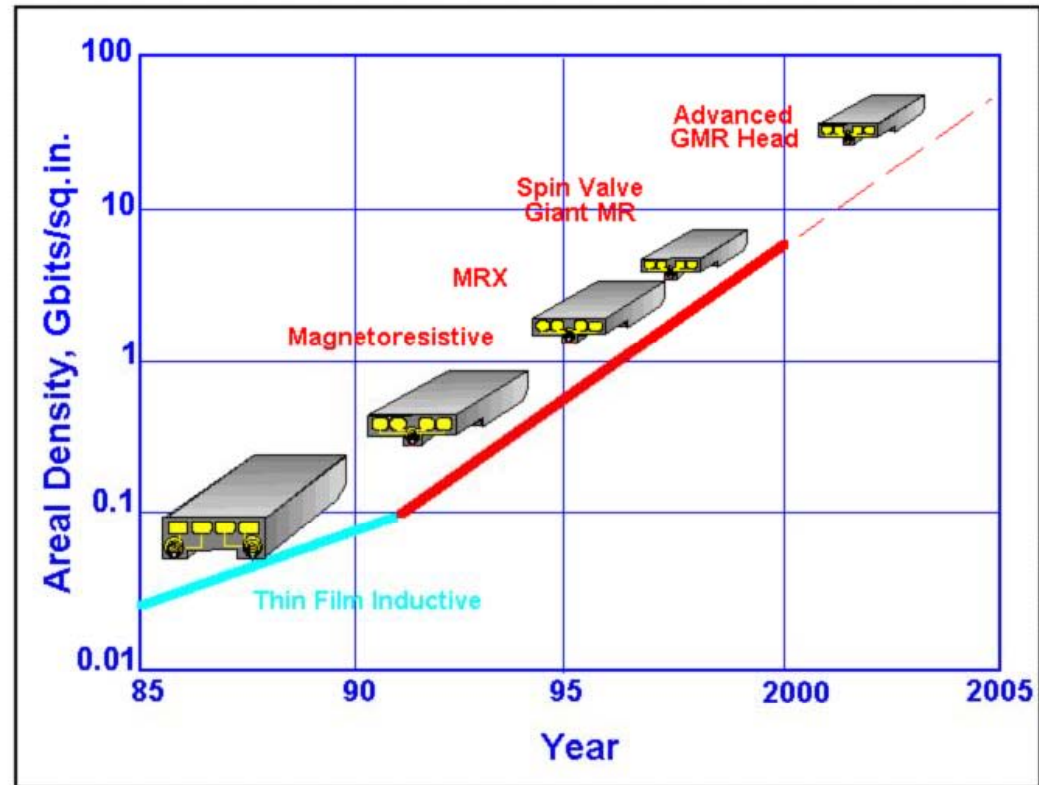


Figure 10. Magnetic head evolution

ALGUNAS APLICACIONES DEL EFECTO DE GMR

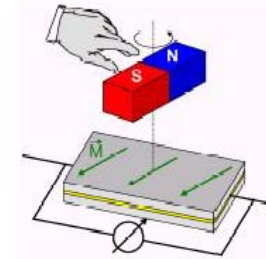
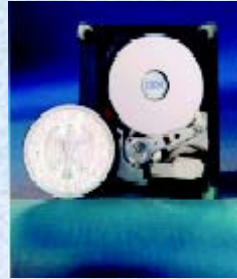


Abbildung 9.7: Typische Anwendung eines GMR-Winkelsensors (aus Siemens Application Notes 10.98).

- Robótica y sensores para controlar movimientos mecánicos (en los vehículos automotores, etc.)
- Sensores del flujo de sangre en el torrente sanguíneo.
- Aplicaciones para MRAM; J. G. Zhu, et al., J. Appl. Phys., 87 (2000) 668.
- Sensores de Presión, combinando el efecto de la MRG con materiales magnetostrictivos (B.A. Gourney, et al. US Patent, 1999).



Sensores de control de tráfico

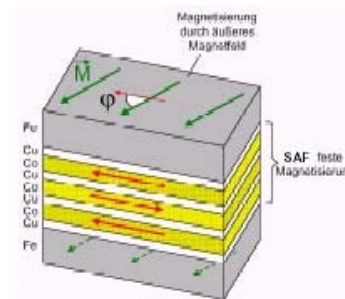


Abbildung 9.6: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Siemens GMR-Sensors (aus Siemens Application Notes 10.98).

CONCLUSIONES

- Con los experimentos de “MOKE”, es posible observar y estudiar el comportamiento dinámico en películas delgadas ferromagnéticas; y el uso del láser ha probado ser una herramienta importante para realizar mediciones magneto-ópticas in-situ, en condiciones de UHV y a bajas temperaturas.
- Las curvas de histéresis magneto-ópticas proporcionan información importante sobre las propiedades intrínsecas de los materiales magnéticos crecidos epitaxialmente.
- Con MOKE, es posible determinar la T_c , analizar el acoplamiento magnético entre capas y estudiar la anisotropía magnética.
- La dispersión de luz “LS” por ondas de espín, utilizando la espectroscopía de Brillouin, permite observar la propagación de los modos de superficie y volumen; y determinar varios parámetros magnéticos en materiales estructurados. LS también ha probado ser un método nuevo para observar el desdoblamiento Zeeman del estado fundamental $^8S_{7/2}$ de los iones de Eu y de cualquier otro ion; i.e., la observación de la resonancia paramagnética $\omega = \gamma B_0$.
- La investigación de estructuras de películas magnéticas ha contribuido a la mejor comprensión de las interacciones magnéticas y otros fenómenos. Resulta claro que la mayoría de los efectos investigados han encontrado aplicaciones interesantes en la ciencia y tecnología, como lo es el ejemplo particular del fenómeno de GMR, descubierto por Grünberg y Fert.