

Closure Domain 法에 의한 Permalloy 磁性 薄膜의 磁壁 Energy 密度

李 英 善 · 金 正 華 *
教 養 科

〈요 약〉

Permalloy 자성 박막의 자벽 energy 밀도는 이방자장의 함수로서 closure domain 방법으로 측정된다. 이방자장의 변화는 기관의 조건을 달리하는 double layer technique를 이용한다. glass substrate 위에 Aluminum을 $100\text{\AA} \sim 900\text{\AA}$ 정도의 두께로 진공증착하고 그 위에다 다시 균일한 자장하에서 Permalloy (80% Ni-20% Fe)를 700\AA 정도의 두께로 진공증착하면, 단일 Permalloy layer보다 큰 보자력 H_c 및 이방자장 H_k 를 나타낸다. Aluminum 두께에 따르는 이방자장 H_k 의 변화는 hysteroscope로 측정 했다. 얻어진 시료를 용이축 방향으로 천천히 감소하는 ac자장 속에 넣어서 소자 시킨 후 closure domain을 Bitter powder pattern technique에 의해 현미경으로 관찰 및 사진 촬영했다. 자벽 energy 밀도는 이방자장의 함수로 표시되며 큰 이방자장의 박막에서는 closure domain이 나타나지 않았으며 Kittel⁽¹⁾와 Kuwahara⁽²⁾의 제안에 따라 용이축 방향에 평행한 180° 자벽만이 나타났다. Aluminum 증착하의 두께가 700\AA 인 Permalloy막에서 180° 자벽 energy 밀도는 $2 \sim 3 \text{ erg/cm}^2$ 의 값을 얻었다.

Studies on Domain Wall Energy Density of Permalloy Thin Films by The Method Closure Domain

Yeong Sun Lee · Kim Jeong Hwa
Dept. of Basic studies

〈Abstract〉

Domain wall energy density of permalloy thin film was measured as a function of anisotropic magnetic field by the method of closure domain.

To control anisotropic magnetic field, the double layer technique was used. Aluminum was evaporated onto a glass substrate with various thickness ($100\text{\AA} - 900\text{\AA}$). Subsequently thin films of Permalloy (80%Ni-20% Fe), $300\mu - 400\mu$ wide and 700\AA thick, were evaporated onto the aluminum thin film under a uniform field of 60 Oe in order to introduce a uniaxial anisotropy.

The anisotropy field (H_k) of such a double layer was found higher than that of a single permalloy layer.

Closure domains were obtained by slowly decreasing AC field in the easy direction. Bitter powder pattern method was used to observe the domains. The energy density of the 180° walls between the adjacent main domains were measured to be $2 \sim 3 \text{ erg/cm}^2$.

The films having higher H_k did not exhibit closure domains but only 180° walls parallel to the easy axis, as was also proposed by Kittel⁽¹⁾ and Kuwahara⁽²⁾.

* 인하대 응용물리학과

I. 서 론

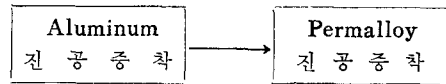
자성박막은 두께가 얇기 때문에 고주파 자장하에서 eddy current 손실이 적고 막면내의 어느 한방향 또는 그반대방향으로만 자화가 향하기 쉬운 일축이방성을 가지고 있다. 그러므로 자화가 막면내에만 한정되어 반전이 빠르고 그 자기이력곡선이 거의 4각형에 가까워서 보자력 보다 작은 반전자장에서는 반전이 일어나지 않으며 전력 소모가 적다는 등의 특징 때문에 전자계산기의 박막기억 소자 및 논리소자에 많이 이용된다. 본 실험은 Permalloy 자성박막의 자벽 energy 밀도를 그 이방자장의 함수로 측정하는 것을 목적으로 한다. Permalloy의 자벽 energy 밀도는 처음에 Middelhoek⁽³⁾에 의해 계산 되었다. Brown과 LaBonte⁽⁴⁾ 및 Kichmer와 Döring⁽⁵⁾ 등은 Middelhoek의 방법을 수정한 계산을 하였으며 그들은 모두 자벽내에서 자화가 회전하는 과정에서 energy가 최소가 되는 조건을 사용 하였다. 자벽 energy 밀도를 측정하는 방법에는 closure domain 방법과 channel내의 자구첨단 이용에 의한 방법이 있다. 자벽 energy 밀도의 측정은 Kuwahara⁽²⁾, Daughton⁽⁶⁾ 등이 발표하였는데 그들은 평형상태에 있는 강자성막의 자구는 energy가 최소가 되는 closure domain을 이룰 것 이란 점에 착목하여 closure domain의 크기를 측정하는 것에서 자벽 energy 밀도를 얻었으나 이론치와 좀 차이가 있다. 좁은 channel내의 자구첨단이동에 의한 energy 밀도 측정은 Baldwin⁽⁷⁾에 의해 제안되고 Park⁽⁸⁾에 의해 측정된 바 있으나 위의 두 방법에 의한 측정은 서로 다를 뿐만아니라 이론치

와도 좀 차이가 있다. 본 실험논문은 상기의 closure domain 방법을 택하여 기판의 조건을 달리하여 이방자장(H_k)을 변화시킬 때 생기는 closure domain에서 부터 이방자장과 자벽 energy 밀도와의 관계를 조사 연구하였다.

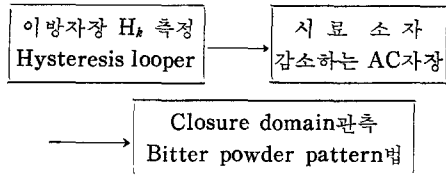
II. 실험

시료의 제작과정 및 그 자기적 성질의 측정과정을 block diagram으로 표시하면 다음과 같다.

시료 제작



측정



기판의 조건을 달리하기 위하여 double layer technique에 의해 깨끗이 세척한 slide glass substrate를 진공 ($10^{-5} \sim 10^{-6}$ torr)중에서 150°C 의 온도를 유지하면서 약 $100\text{\AA} \sim 900\text{\AA}$ 정도의 두께로 Aluminum박막을 진공증착하였다. 진공도 7×10^{-6} torr이하에서 Al coating된 기판의 온도를 300°C 로 유지하면서 Permalloy (80% Ni-20% Fe)ingot를 tungsten helical coil로 가열 증착했다. 이때 일축이방성을 형성 시키기 위하여 Helmholtz coil로 일정한 자장 60 Oe를 그림 1에 표시한 용이축

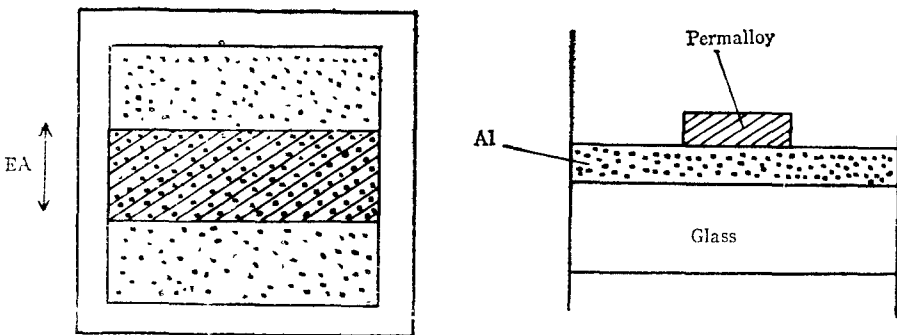


그림 1. 시료의 모양

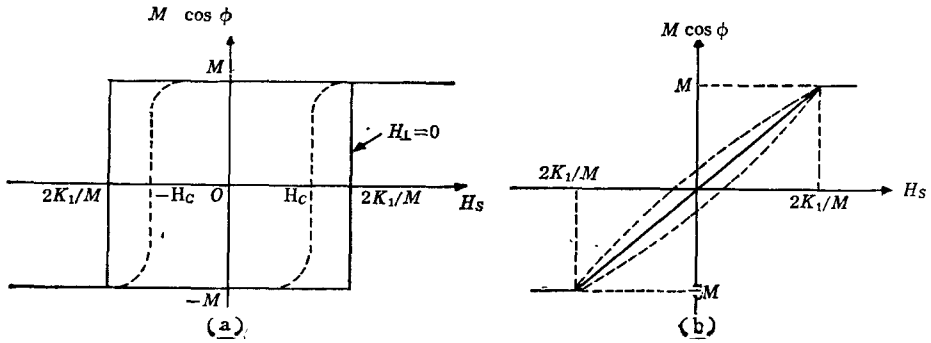


그림 2. Longitudinal and Transverse Hysteresis Loop of Thin Films.

방향으로 걸어주고 slit를 가진 mask를 사용하여 permalloy막의 폭은 $300\mu\sim 400\mu$ 정도로 하였다. 또한 skew현상을 방지하기 위하여 filament로 부터 기관까지의 거리를 약 30cm로 하였으며, 증착속도는 $7\sim 10\text{\AA}/\text{sec}$ 로 유지했다.

얻어진 permalloy 증착막의 두께는 대략 700\AA 정도가 되며 시료의 모양은 그림 1과 같다.

이렇게 double layer법에 의해 형성된 막에서는 단일 permalloy막보다 큰 보자력 H_c 및 이방자장 H_k 를 나타낸다. 자성박막의 용이축(easy axis)방향과 곤란축(hard axis)방향의 이론적인 자기이력 곡선은 자화반전이 자벽의 이동으로도 일어나기 때문에 그림 2와 같다. 그러나 실제의 막에서는 그림 2의 점선과 같은 모양이 생긴다.

용이축방향 (a)의 자장이 $H_k = \frac{2K_1}{M}$ 에 달하면 자화는 비가역적인 역전이 생기며 곤란축 (b) 방향으로 자장이 $H_k = \frac{2K_1}{M}$ 에 달하면 막은 포화하게 된다. 이 $H_k = \frac{2K_1}{M}$ 가 이방자장이며 K_1 이 이 방상수이다. 이방자장의 값은 본 실험에서 제작한 high sensitive hysteresis loop로 이미 발표된 $M-H$ 도 및 $\dot{M}-H$ 도와 $\dot{M}-t$ 도 및 $\ddot{M}-t$ 도⁽⁹⁾를 측정하는 방법으로 용이축 또는 곤란축 방향에 포화시키는데 요하는 자장을 구하여 H_k 의 값을 얻었고 $K_1 = \frac{H_k M}{2}$ 식에서 K_1 의 값을 구했다. 이방자장의 크기가 결정된 시료를 용이축 방향으로 철저히 감소하는 AC자장 속에 넣어서 소자시킨다. 이렇게 소자된 시료는 energy가 최소되는 closure domain을 형성할 것이 기대된다. 자벽에는 spin의 회전에 의해 생긴 강한 국소자장이 있기 때문에 자철광과 같은 강가성물질의 작은 분말의 colloidal suspen-

sion을 시료위에 떨어뜨리고 cover glass로 덮어서 얇은 액막을 만들면 작은 magnetite분말은 이 국소 자장에 끌려 자구경계에 집중하게 된다. 이러한 자구관측방법을 Bitter powder pattern technique라 한다. 이 방법으로 형성된 closure domain을 금속현미경으로 150배의 배율로 관찰 및 사진 촬영하였다.

III. 결과 및 고찰

자구의 성인은 그림 3에서 보는 바와 같이 강자성 단결정의 단면의 구조를 생각함으로써 알 수 있다.

(a)는 자구가 하나인 경우의 포화 배치이다. 결정 표면에 자극이 형성되고 이 결과 이 배치는 아주 큰 값의 자장 energy $(\frac{1}{8\pi} \int H^2 dV)$ 를 갖는다. (b)에서는 결정이 반대방향으로 자화된 두 자구로 나누어진 결과 자장 energy가 약 반으로 감소되어 있다. 이런 분할은 (c)와 같이 더 계속되어 N개의 자구의 경우에는 자장의 공간적인 범위가 축소되었기 때문에 포화배치 (a)의 자장 energy의 약 $1/N$ 로 감소한다. (d)와 (e)는 자장 energy가 zero인 자구배치로 결정의 저면 부근의 3각형 prism 모양의 자구(페로자구)의 양편에 있는 베노난 자구의 자화에 대하여 각 45° 를 이룬다. 따라서 경계에 수직한 자화성분은 경계면에서 연속이고, 결정내 어느곳에도 자극이 형성되지 않는다. 자극이 없으므로 자화에 관련된 자장이 없으며 자속의 회로가 결정내에서 완전히 닫힌다고 말할 수 있다. 따라서 이것을 closure domain이라 칭한다. Landau와 Lifshitz⁽¹⁰⁾에 의하면 소자된 자성박막에서는 energy

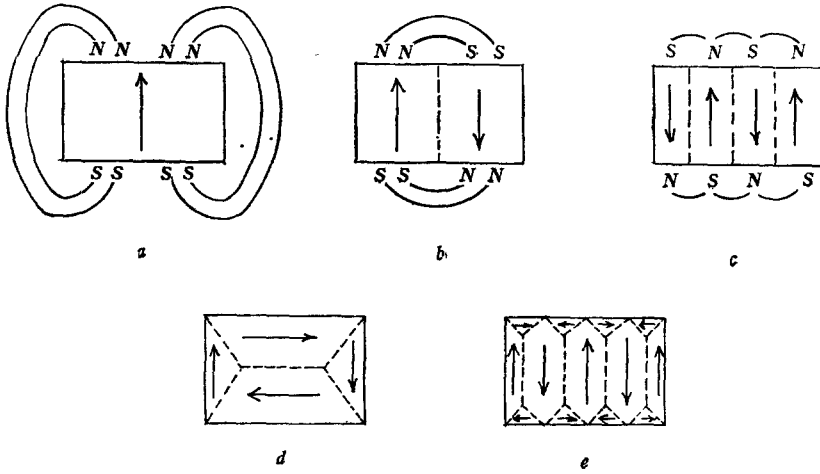


그림 3. Closure Domain Method.

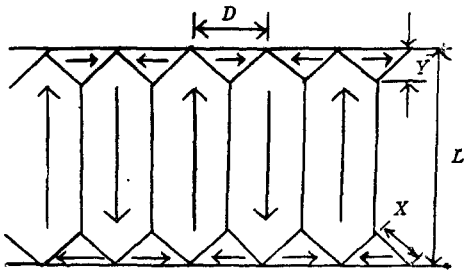


그림 4. Closure Domain의 사양

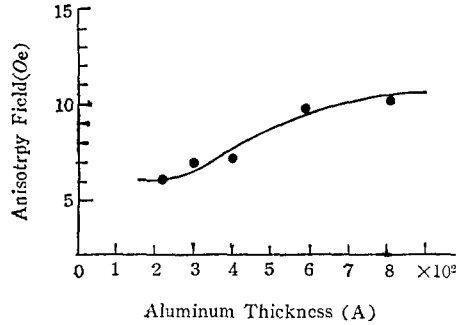


그림 5. Under coating한 Aluminum의 두께와 그 뒤에 Coating된 700Å permalloy 막의 이방자장과의 관계

가 최소가 되는 상태로서 90° closure domain이 나타 난다. 그림 4에서 자구의 폭 D 는 σ_w , L , 그리고 K_1 의 함수로서 결정된다. 여기서 σ_w 와 K_1 은 단위 면적당 벽표면 energy 밀도와 이방상수(이방성 energy)이며 L 은 film의 linear dimension이다. 자벽 energy $E_w = \sigma_w S \dots (1)$, (S 는 body내 자구 경계의 총 면적)

이방성 energy $E_a = K_1 V_a \dots (2)$, (V_a 는 자화가 용이축을 향하지 않는 자구의 총체적)

(1) 식에서 $E_w = \sigma_w \{4XNT + N(L-2Y)T\} \dots (3)$

여기서 N 은 자구의 수이며 기하학적으로

$$X = D/\sqrt{2}, \quad Y = D/2$$

임을 쉽게 알 수 있다. $NDL=1$ 의 단위면적에 대해 (3)식은

$$E_w = \sigma_w \left(2\sqrt{2} + \frac{L+D}{D} \right) \frac{T}{L} \quad (4)$$

한편 이방성 energy

$$E_a = K_1 (2N) \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{D^2}{\sqrt{2}} \right) T = K_1 \frac{D}{2} \cdot \frac{T}{L} \quad (5)$$

소자한 상태에서는 막의 단위면적당 총 energy $E = E_w + E_a$ 가 최소가 되는 closure domain을 취할 것이니까 자구의 폭 D 는 $\frac{\delta E}{\delta D}$ 을 만족해야 한다. 그리하여

$$D = \left(\frac{2\sigma_w L}{K_1} \right)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (6)$$

따라서 실험에 의해 D , L 및 K_1 을 측정하면 (6) 식에서 energy밀도 σ_w 가 얻어진다. 여러 가지 두께를 갖는 Aluminum기판위에 진공증착한 permalloy막의 이방자장을 자기이력곡선 장치로 측정 한 결과는 그림 5와 같다.

Aluminum막의 두께는 500Å 이상에서 Tolansky의 multiple beam interferometry method로 측정했고 500Å이하의 영역에서는 증량비에 의해 측정하였다. under coating한 Aluminum막의 두께가 두꺼워 질수록 Permalloy막의 이방자장은 증가하는데 이 경향은 Sugatani⁽¹¹⁾등이 얻은 결과와 일치한다. 그러나 이방자장은 substrate의 조건에따

일치되는 것이 아니고 막의 두께 증착속도 등 여러 인자에 관계되는 것이기 때문에 Aluminum 두께와 Permalloy막의 이방자장 사이의 관계를 일률적으로 정립 할수는 없다. 이 그림 5에서는 후에 closure domain을 얻을 수 있었던 시료에 대한 것만이기 때문에 측정 수치가 대단히 제한되었고 개중에는 그림 5의 경향과는 전혀 다른 시료가 있었으나 그것들을 버렸다. 이들은 아마도 Permalloy coating의 불충분과 심한 skew현상에 의한 것으로 추정된다. 얻어진 시료를 용이축 방향에 점차 감소하는 AC자장 속에 넣어 소자한 후 Bitter pattern 방법으로 관찰한 closure domain의 사진이 그림 6이다.

Closure domain은 Permalloy막의 즉, 두께 및



그림 6. 관측된 Closure Domain의 사진

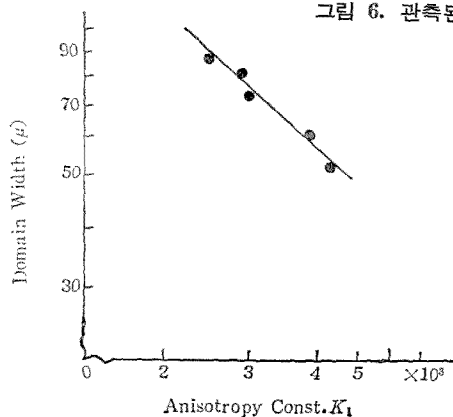


그림 7. 자구폭과 이방상수의 관계

이방자장이 잘 어울리는 경우에만 나타났으며 두께가 700Å 정도의 permalloy막인 경우에는 막의 폭이 300 μ ~400 μ 이고 이방상수 K_1 이 2,000~4,500 erg/cm³ 영역에서 closure domain이 나타나는 빈도가 많았다. 이런 영역에서도 closure domain이 반드시 나타나는 것은 아니었다. 이 사실은 energy의 최소 상태가 closure domain 상태로 나타난다고 가정할 때 소자에 의하여 반드시 energy최소상태에 달하는 것이 아님을 암시하는 것 같다. 얻어진 closure domain에서 permalloy막의 폭 L , 및 180° 자벽간의 거리 D 를 측정하여 D 와 이방상수 K_1 과의 관계를 조사한 것이 그림 7이다.

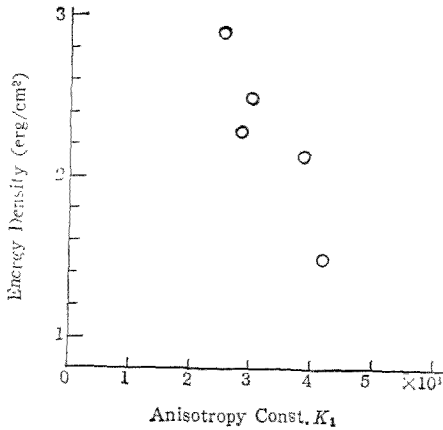


그림 8. 180° 자벽 밀도와 이방상수의 관계 *

이 그림에서 보면 $\log D$ 와 $\log K_1$ 의 기울기가 대략 1/2이 되고 있는데 이것은 이론식 (6)과 대단히 잘 일치한다. 측정치 D , L , K_1 을 (6)식에 넣어서 얻어진 자벽 energy 밀도 σ_w 와 이 방상수 K_1 의 관계를 조사한 것이 그림 8이다.

이것에 의하던 예측했던 것과는 반대로 K_1 가 증

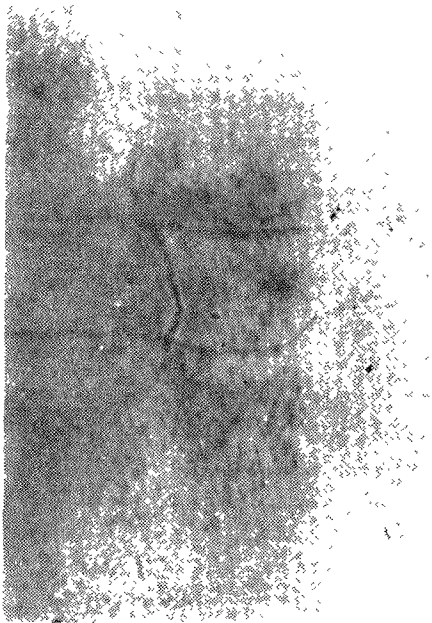


그림 9. 이방상수가 변하는 경계에서의 자구모양의 변화

가함에 따라서 energy 밀도가 감소함을 보인다. 본 실험에서는 700Å의 permalloy 자성박막의 자벽 energy 밀도 σ_w 가 2~3 erg/cm²로 얻이었는데 이것은 같은 방법으로 얻은 Kuwahara⁽²⁾의 측정치 0.8 erg/cm²보다는 훨씬 이론치에 가까우며 Daughton⁽⁶⁾의 2.4~3.4 erg/cm²결과와 거의 비슷하다. K_1 의 값이 2,000 erg/cm³ 이상이 되는 막에서는 closure domain을 형성하지 않고 병행한 180° 자벽만 관찰되었다. 이것은 K_1 의 값이 크기 때문에 closure domain 상태의 자화가 교차로 180°씩 변하는 상태보다 energy가 크다는 것을 의미한다. 이런 구조는 Kittel⁽¹⁾에 의해 제안된바 있다. closure domain 구조에서 부터 비 closure domain 구조로 변하는 K_1 의 값은 10,000 erg/cm³ 영역으로 넓혀 졌으며 그림 9는 이것을 나타낸다.

평행자벽이있는 자성박막은 Aluminum 기판위에 coating한 것으로 그 K_1 의 값은 10,000 erg/cm³이나 edge domain이 있는 곳은 glass substrate 상에 permalloy가 coating된 것으로 K_1 의 값은 2,500 erg/cm³였으며 두 막의 경계에서 closure-n-closure의 변화가 일어난 것으로 해석된다.

Ⅶ. 결 론

소자된 좁은 폭의 permalloy 막의 자벽을 Bitter powder pattern법으로 closure domain을 관찰하여 다음 결과를 얻었다.

(1) permalloy 막의 폭이 300μ~400μ이고 이방상수 K_1 가 2,000~4,500인 erg/cm³ 영역에서 closure domain을 관찰 할 수 있었다.

(2) closure domain에서 180° 자벽간의 거리 D 와 이방상수 K_1 의 관계는 이론식

$$D = \left(\frac{2\sigma_w L}{K_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

과 거의 일치한다.

(3) 두께의 700Å의 permalloy막의 자벽 energy 밀도는 2~3 erg/cm²이다.

(4) 이 방상수 K_1 가 증가함에 따라 자벽 energy 밀도 σ_w 는 감소한다.

(5) 이방상수 K_1 가 20,000 erg/cm³이상이 되면 closure domain은 형성되지 못하고 용이축에 평행한 180° 자벽만이 이루어진다.

(6) closure domain구조에서 non-closure domain 구조로 변하는 것은 이방상수의 값에 기인된다고 생각된다.

<부 기>

본 실험은 인하대학교 응용물리학과 고체물리학 연구실에서 박영걸 박사의 지도하에 행하여 졌음을 밝힙니다.

References

1. C. Kittel, Phys. Rev., **70**, 965 (1946).
2. K. Kuwahara, T. Goto, A. Nishimura, and Y. Deakl, J. Appl. Phys., **35**, No. 2, Part 2, 820—821 (1964).
3. S. Middelhoek, "Ferromagnetic Domains in Thin Ni-Fe Films", Drukkerij Wed. G. Van Soest, N. V., Amsterdam (1961).
4. W. Brown and A. LaBonte, J. Appl. Phys., **39**, No. 2, 1380 (1965).
5. R. Kirchner and W. Döring, J. Appl. Phys., **39**, 855 (1968).
6. J. M. Daughton, G. E. Keefe, K. T. Ahn and C. C. Cho, IBM, J. Res., Devel. **11**, 555 (1967).
7. J. A. Baldwin, Jr. J. Appl. Phys., **30**, 432 (1968).
8. Y. K. Park, New Phys., No. 3, 95 (1973).
9. Y. K. Park, Y. S. Lee and K. Y. Suh, New Phys., **16**, 77 (1976).
10. L. Landau and E. Lifshitz, Physik Z. Sowjet union **8**, 153 (1935).
11. S. Sugatani, K. Konishi and Y. Sakurai, I. E. E. Trans., **Mag 4**, 445 (1968)